

# Badania wpływu promieniowania elektromagnetycznego na komponenty matryc biosensora

Aleksandra Kłos-Witkowska, Vasyl Martsenyuk

Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Katedra Informatyki i Automatyki, Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała

**Streszczenie:** W pracy za pomocą zmian przewodności zbadano zmiany konformacyjne proteiny BSA oraz jej kompleksów (BSA-Au oraz BSA-NAA) pod wpływem promieniowania UV oraz MF aplikowanego frakcyjnie w dawkach ( $3 \times 10$  min oraz  $6 \times 10$  min) oraz w sposób ciągły (30 min, 60 min). Wykonano analizę porównawczą wpływu promieniowania UV i mikrofalowego w dawkach ciągłych i frakcyjnych na BSA, BSA-Au, BSA-NAA oraz przeanalizowano czułość na pole elektromagnetyczne z zakresu UV i MF dla badanych substancji. Udowodniono efekt przyspieszonych zmian konformacyjnych pod wpływem pola elektromagnetycznego z zakresu UV i MF. Wykazano wpływ czynników na stabilność BSA i jej kompleksów zależny od: rodzaju czynnika, sposobu jego aplikacji oraz czasu ekspozycji. Najbardziej czuły na pole elektromagnetyczne okazał się kompleks BSA-Au.

**Słowa kluczowe:** biosensor, BSA, MF, UV, konduktometria, stabilność

## 1. Wprowadzenie

Ponad 99 % cieczy na Ziemi przewodzi prąd. Podczas swej 100-letniej historii pomiary takie zyskały status odrębnej dziedziny pomiarów zwanej konduktometrią [1]. Pomiary konduktometryczne rozpoczęły się już w XVIII wieku, kiedy Andreas Baumgartner zauważył, że sól i wody mineralne z Bad Gastein w Austrii przewodzą prąd elektryczny [2, 3]. W związku z tym wykorzystanie konduktometrii do celów badawczych rozpoczęło się w 1776 r. [4]. Friedrich Kohlrausch rozwinął konduktometrię w latach 60. XIX wieku, kiedy zastosował prąd przemienny do wody, kwasów i innych roztworów. Właściwości roztworów, w tym ich zdolność do przewodzenia prądu elektrycznego, opisuje i wyjaśnia elektrostatyczna teoria elektrolitów [5]. Podstawy współczesnej teorii elektrolizy opracowali w latach 1920–1960 Debye, Huckel, Onsanger, Fuoss, Flackenhagen i inni [1], jej rozwój dalej trwa. Wielkość przewodnictwa zależy od wszystkich jonów obecnych w roztworze i od reakcji zachodzących między nimi. Obecność jonów jest przyczyną przewodnictwa elektrolitycznego roztworów. Współcześnie badania nad biosensorami przebiegają w dwóch nurtach:

eksperymentalnym [6–8] oraz teoretycznym [9–13]. Wśród nich znajdują się eksperymenty z wykorzystaniem konduktometrii, gdzie procesy biochemiczne zachodzące w czujnikach są wyjaśniane na podstawie przewodnictwa [14, 15]. Podążając za nurtem współczesnych badań biosensorowych, w prezentowanej pracy wykorzystano badania przewodnictwa do monitorowania zmian konformacyjnych zachodzących w składnikach matryc pod wpływem pola elektromagnetycznego z zakresu UV (ultrafioletu) oraz MF (mikrofal) aplikowanych w dawkach frakcyjnych i ciągłych. Zbadano wpływ promieniowania elektromagnetycznego (EMF) na stabilność. Do badań wybrano białko albuminy surowicy bydłowej BSA (ang. *Bovine Serum Albumin*), które jest powszechnie stosowane w warstwach receptorowych biosensorów podczas sieciowania [16] oraz jego kompleksy BSA-Au, BSA-NAA.

Stabilność białka BSA jest bardzo ważna, gdyż białko to bierze udział w procesach sieciowania składników warstwy receptorowej (cross-linking proces). Utrata stabilności białka wpływa na stabilność matrycy biosensora, a to z kolei przekłada się na czas użytkowania całego urządzenia [17]

Dokonano analizy porównawczej wpływu promieniowania UV i mikrofalowego w dawkach ciągłych i frakcyjnych na: BSA, BSA-Au, BSA-NAA chcąc odpowiedzieć na pytania: Czy sposób aplikacji czynnika wpływa na zmiany konformacyjne proteiny i jej kompleksów zachodzące w czasie? Które promieniowanie (UV, MF) wpływa bardziej na procesy konformacyjne zachodzące z czasem w proteinie, czy promowanie elektromagnetyczne wpływa podobnie: na czyste białko BSA jak i jego kompleksy BSA-Au, BSA-NAA?

Nowością w pracy jest analiza porównawcza wpływu promieniowania UV i MF ze względu na sposób aplikacji czynnika

### Autor korespondujący:

Aleksandra Kłos-Witkowska, awitkowska@ath.bielsko.pl

### Artykuł recenzowany

nadesłany 27.08.2023 r., przyjęty do druku 09.11.2023 r.

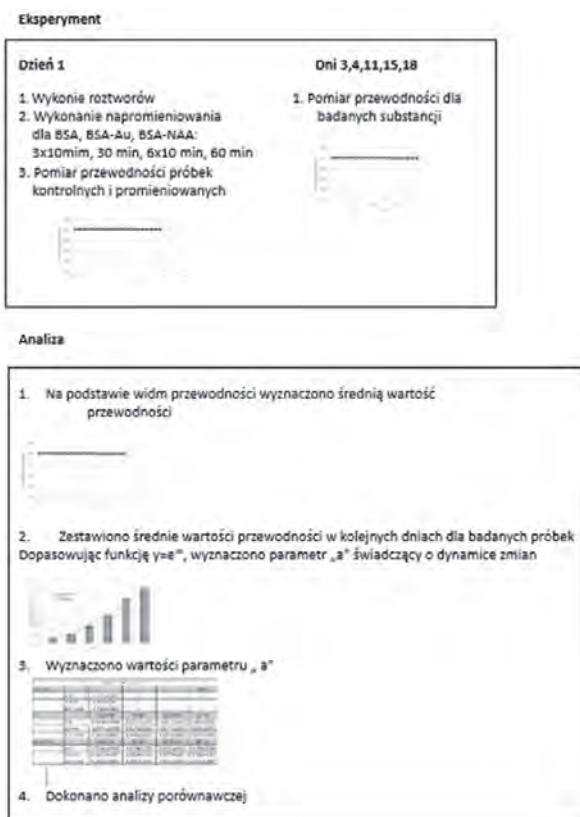


Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

(w trybie ciągłym i frakcyjnym) oraz śledzenie za pomocą konduktometrii zmian stabilności zachodzących wraz z czasem dla proteiny i jej kompleksów a także określenie czułości na pole elektromagnetyczne z zakresu UV i MF badanych substancji.

## 2. Materiał i metoda

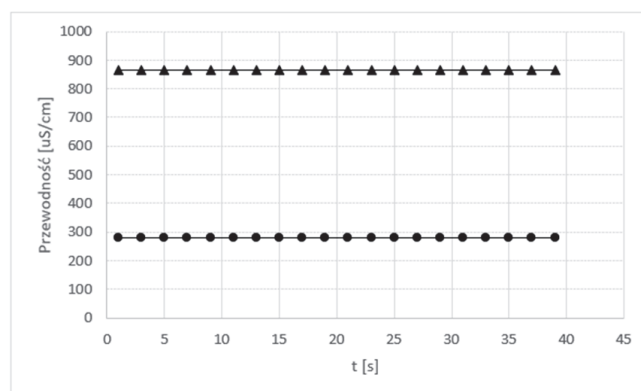
Do badań przewodności roztworów skonstruowano specjalne stanowisko pomiarowe zawierające: konduktometr firmy Elmetron, model CC-401 wraz z sondą; stojak, umożliwiający pomiar przewodności roztworu zawsze na tej samej głębokości zanurzenia sondy oraz komputer. Pomiarzy wykonano dla wodnych roztworów Albuminy Surowicy Bydłęcej (BSA) oraz jej kompleksów BSA-Au, BSA-NAA. Nanocząstki złota (Au) to zawiesina stabilizowana, wielkość nanocząsteczek 10 nm została wybrana ze względu na jej standardowe zastosowanie w warstwach receptorowych biosensory. NAA to metabolit mózgowy (N-acetyloasparaginian) – forma syntetyczna. Jego podwyższoną wartość obserwuje się w chorobach neurodegeneracyjnych. Eksperyment wykonano dla roztworów wodnych, biorąc pod uwagę doniesienia naukowe [19], że taki roztwór pozwala lepiej poznać właściwości fizykochemiczne badanych substancji. W doświadczeniu wykonano pomiar przewodności dla roztworów poddanych ekspozycji czynników zewnętrznych jakimi były: promieniowanie UV oraz promieniowanie MF. Temperatura w czasie trwania eksperymentu była stale monitorowana. Była stała i wynosiła 22 °C. Ekspozycji na czynnik zewnętrzny przeprowadzono w pierwszym dniu badania. Zmiany przewodności w czasie monitorowano w kolejnych dniach: 1, 3, 4, 11, 15, 18. Wartość przewodności określono na podstawie 20 pomiarów. Sygnał był próbkowany automatycznie co 2 sekundy za pomocą konduktometru firmy Elmetron, model CC-401. Analizę przeprowadzoną w artykule wykonano na podstawie średniej przewodności wyznaczonej z 20 zebranych pomiarów i 3 wykonanych serii pomiarowych. Schemat przeprowadzenia badań i ich analiza przedstawiono na Rys. 1.



Rys. 1. Schemat eksperymentu  
Fig. 1. Scheme of the experiment

## 3. Rezultaty i dyskusja

Na rysunku 2 zobrazowano przykładowy numeryczny pomiar przewodnictwa w temperaturze 22 °C kompleksu BSA-Au eksponowanego na promieniowanie UV aplikowane frakcyjnie (3 × 10 min) w 4. dniu trwania eksperymentu oraz dla porównania w 18. dniu. Jak widać na rysunku, za każdym razem, gdy wykonywany jest pomiar, przewodnictwo jest odczytywane automatycznie 20 razy. Pomiar trwał 39 sekund, sygnał był pobierany co 2 sekundy. Na podstawie zebranych danych wyznaczono średnią wartość przewodnictwa, którą wykorzystano w kolejnych analizach. Można zauważyć, że przewodnictwo w czasie przy stałej temperaturze 22 °C oraz w badanych przedziale czasowym (39 s) jest stałe. Jednak wartość przewodnictwa z upływem czasu wzrasta (porównując wartość przewodnictwa w 4. i 18. dniu). Jednak charakter przebiegu pozostaje stały.



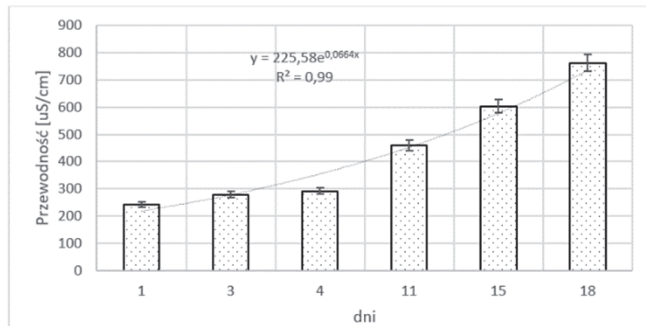
Rys. 2. Przykładowe numeryczne przedstawienie pomiaru przewodności w czasie 39 s w temperaturze 22 °C dla BSA-Au eksponowanych na promieniowanie UV aplikowane frakcyjnie (3 × 10 min) w 4. dniu trwania eksperymentu (koła) oraz w 18. dniu (trójkąty)

Fig. 2. Example numerical representation of conductivity measurement at 39 s at 22 °C for BSA-Au exposed to UV light applied fractionally (3 × 10 min) on 4th day of the experiment (circles) and on 18th day (triangles)

Ze względu na to, że badaniu poddano wodne roztwory, w eksperymencie występuje przewodnictwo jonowe, gdzie nośnikami ładunku są jony. W przeciwieństwie do przewodnictwa elektronów, które występuje głównie w metalach, i gdzie ładunek jest przenoszony przez elektrony, lub w półprzewodnikach, gdzie jako nośniki ładunku wykorzystywane są elektrony lub dziury [18].

Jak wiadomo z literatury [1] ruch jonów jest wypadkową trzech czynników: ruchów cieplnych o charakterze losowym, przepływu ośrodka jako całości oraz sił działających na te jony. Te ostatnie siły mogą pochodzić zarówno z wewnątrz, jak i z zewnątrz. Siły wewnętrzne są wynikiem różnych gradientów: stężenia, temperatury, prędkości i oddziaływań elektrostatycznych między jonami. Siła zewnętrzna może być spowodowana zmianą ciśnienia, polem grawitacyjnym lub elektrycznym. Dlatego w dalszej pracy pokazano wpływ promieniowania UV oraz MF na siły zewnętrzne. Indukowane zmiany przewodnictwa jonowego badanej substancji określa się na podstawie zmierzonego przewodnictwa. Przewodność jest również parametrem, za pomocą którego obserwuje się zmiany czasowe zachodzące w badanych próbkach.

Rysunek 3 stanowi przykład zmiany parametrów przewodności wraz z upływem czasu. Widać, że w miarę starzenia się próbek czyli ich utraty stabilności wartość przewodności wzrasta, świadczy to o zmianach konformacyjnych w proteinie i w jej kompleksach zachodzących wraz z upływem czasu. Zmiany te mogą być związane z przegrupowaniem cząsteczek w lokalnym środowisku badanego roztworu, zmianą uporządko-



Rys. 3. Zmiana parametrów przewodności wraz w upływie czasu dla BSA-Au poddanej ekspozycji ciągłej (30 min) na promieniowanie mikrofalowe (MF)

Fig. 3. Change in conductivity parameters with time for BSA-Au subjected to continuous escaping (30 min) to microwave radiation (MF)

wania łańcucha polipeptydowego, zmianą w strukturze drugorzędowej białka, wzrostem ilości konformacji helisy i zmniejszenie struktury arkusza beta (co prowadzi do rozluźnienia szkieletu białka), tworzeniem agregatów białkowych prowadzących do denaturacji białka, procesami destrukcyjnymi w aminokwasach aromatycznych białka, zmianami odległości w łańcuchu polipeptydowym, osłabieniem stabilności białka pod wpływem rozpuszczalnika, reorganizacją wody oraz zmianami oddziaływań elektrostatycznych van der Waalsa [20].

Aby lepiej zobrazować dynamikę procesu, dokonano fitowania funkcją wykładniczą, którą określono za pomocą dopasowanej linii trendu. Parametr „a” funkcji  $y = e^{ax}$  obrazuje tempo zachodzących zmian. W tabeli 1 znajdują się wyznaczone tą metodą wartości parametru „a” dla próbek kontrolnych oraz próbek poddanych ekspozycji na pole elektromagnetyczne (UV, MF) w dawkach frakcyjnych ( $3 \times 10$  min,  $6 \times 10$  min) oraz ciągłych (30 min, 60 min). Na ich podstawie dokonano szczegółowej analizy znajdującej się poniżej: Wpływu promieniowania UV i mikrofalowego w dawkach ciągłych i frakcyjnych na BSA, BSA-Au, BSA-NAA

### 3.1. Wpływ promieniowania UV i mikrofalowego w dawkach ciągłych i frakcyjnych na BSA, BSA-Au, BSA-NAA

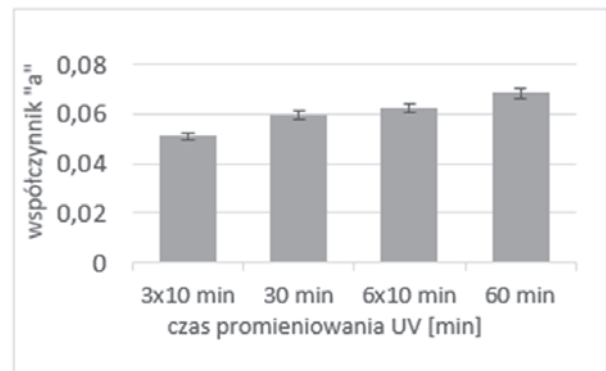
Na podstawie przeprowadzonych analiz widać, że wpływ czynników zewnętrznych na BSA jest zależny od czasu ekspozycji na czynnik i rodzaju czynnika. Poniżej przedstawiono szczegółowo analizę wpływu promieniowania UV i promieniowania MF na składnik sieciujący warstw receptorowych biosensorów (BSA) oraz kompleksów BSA-Au, BSA-NAA.

#### 3.1.1. Wpływ czynników zewnętrznych na BSA

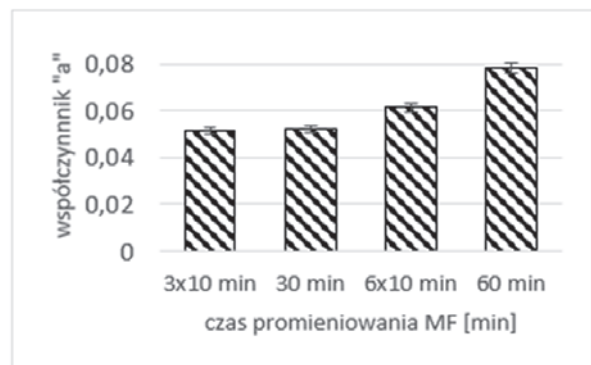
Rysunek 4 przedstawia zmiany współczynnika „a” w wyniku promieniowania BSA w dawkach frakcyjnych  $3 \times 10$  min,  $6 \times 10$  min oraz ciągłych 30 min, 60 min dla promieniowania UV (a) oraz dla promieniowania RF (b). Analizując zmiany wywołane aplikacją promieniowania UV oraz promieniowania MF przez wartości współczynnika „a” widać, że ekspozycja frakcyjna ( $3 \times 10$  min,  $6 \times 10$  min) wywołuje mniejszy efekt niż ekspozycja ciągła (30 min, 60 min).

Porównując czas podania czynnika w sposób ciągły 30 min i frakcyjny 60 min, otrzymano bardziej wyraźny charakter zmian

a



b



Rys. 4. Zmiany współczynnika „a” w wyniku promieniowania BSA w dawkach frakcyjnych oraz ciągłych dla promieniowania UV(a) oraz dla promieniowania RF (b)

Fig. 4. Changes in the „a” factor as a result of BSA radiation at factitious and continuous doses for UV radiation(a) and for RF radiation (b)

Tab. 1. Zestawienie wartości parametru „a” dla próbek poddanych ekspozycji na pole elektromagnetyczne (UV, MF) w dawkach frakcyjnych oraz ciągłych

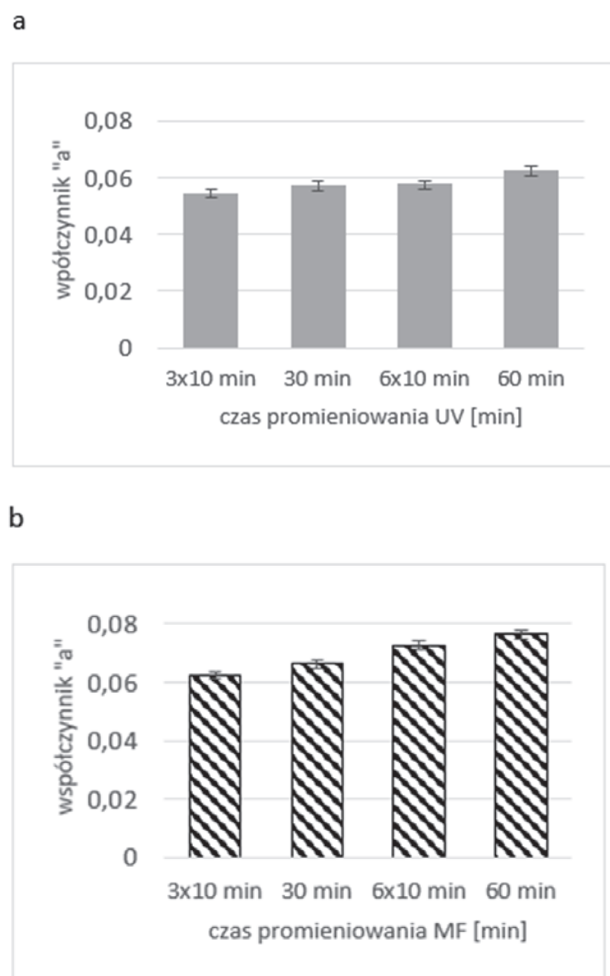
Tab. 1. Summary of „a” parameter values for samples exposed to electromagnetic field (UV, MF) at fractional and continuous doses

Wartości parametru „a”					
UV		$3 \times 10$ min	30 min	$6 \times 10$ min	60 min
	BSA	$0,0510 \pm 0,004$	$0,0593 \pm 0,002$	$0,0622 \pm 0,005$	$0,0681 \pm 0,001$
	BSA + Au	$0,0544 \pm 0,003$	$0,0570 \pm 0,005$	$0,0574 \pm 0,001$	$0,0624 \pm 0,002$
	BSA + NAA	$0,003 \pm 0,0007$	$0,004 \pm 0,0003$	$0,004 \pm 0,0005$	$0,0042 \pm 0,0005$
MF		$3 \times 10$ min	30 min	$6 \times 10$ min	60 min
	BSA	$0,0512 \pm 0,003$	$0,0524 \pm 0,004$	$0,0615 \pm 0,002$	$0,0781 \pm 0,006$
	BSA + Au	$0,0624 \pm 0,005$	$0,0664 \pm 0,003$	$0,0727 \pm 0,004$	$0,0766 \pm 0,003$
	BSA + NAA	$0,0035 \pm 0,0005$	$0,0043 \pm 0,0005$	$0,0044 \pm 0,0002$	$0,0045 \pm 0,0007$

po dłuższej ekspozycji na czynnik. Podobnie jak dla aplikacji w sposób frakcyjny  $3 \times 10$  min i  $6 \times 10$  min. Wyraźniejsze zmiany otrzymano po aplikacji  $6 \times 10$  min niż  $3 \times 10$  min. Największe zmiany dla BSA zaobserwowano po aplikacji promieniowania UV i promieniowania RF w sposób ciągły w czasie 60 min.

### 3.1.2. Wpływ czynników zewnętrznych na kompleks BSA-Au

Rysunek 5 przedstawia zmiany współczynnika „a” w wyniku promieniowania kompleksów BSA-Au w dawkach fakcyjnych  $3 \times 10$  min,  $6 \times 10$  min oraz ciągłych 30 min, 60 min dla promieniowania UV (a) oraz dla promieniowania RF (b).



Rys. 5. Zmiany współczynnika „a” w wyniku promieniowania BSA-Au w dawkach fakcyjnych oraz ciągłych dla promieniowania radiowego UV oraz dla promieniowania MF

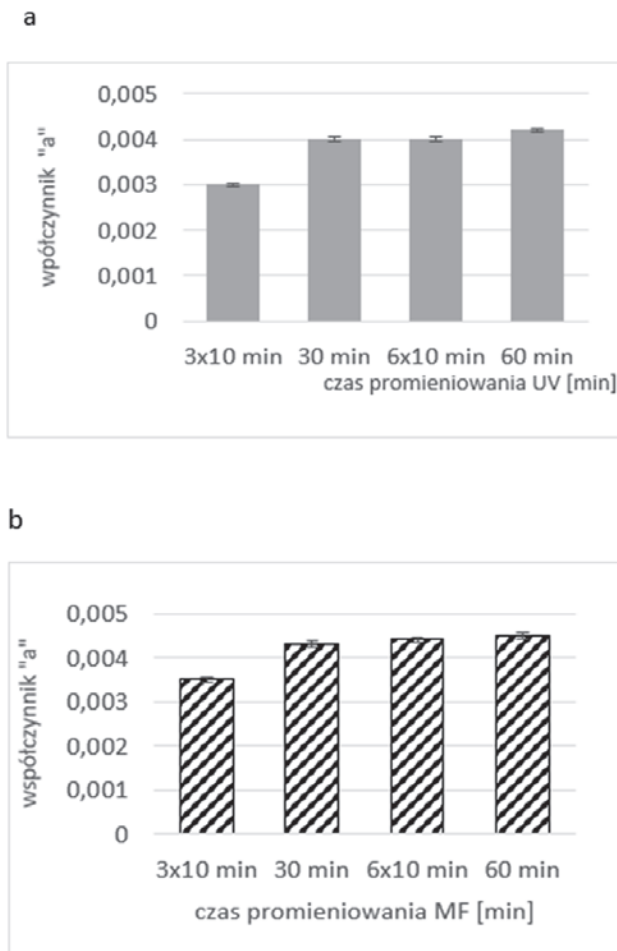
Fig. 5. Changes in the „a” factor as a result of BSA-Au radiation at factitious and continuous doses for UV radiation and for MF radiation

Analizując aplikację promieniowania UV (Fig. 5a) oraz promieniowania MF (Fig. 5b) za pomocą wartości współczynnika „a” widać, że ekspozycja frakcyjna ( $3 \times 10$  min,  $6 \times 10$  min) wywołuje mniejszy efekt niż ekspozycja ciągła (30 min, 60 min). Porównując czas podania czynnika w sposób ciągły 30 min i frakcyjny 60 min, otrzymano wyraźniejszy charakter zmian po dłuższej ekspozycji na czynnik. Podobnie jak dla aplikacji w sposób frakcyjny  $3 \times 10$  min i  $6 \times 10$  min. Wyraźniejsze zmiany otrzymano po aplikacji  $6 \times 10$  min niż  $3 \times 10$  min.

Najmniejsze zmiany dla kompleksów BSA-Au zaobserwowano po aplikacji czynnika (promieniowania UV oraz promieniowania MF) w sposób frakcyjny  $3 \times 10$  min, a największe zmiany dla BSA-Au, podobnie jak dla BSA zaobserwowano po aplikacji promieniowania UV i promieniowania RF w sposób ciągły w czasie 60 min.

### 3.1.3. Wpływ czynników zewnętrznych na kompleks BSA-NAA

Wykresy (Rys. 6a, Rys. 6b) prezentują wpływ promieniowania UV oraz promieniowania MF na BSA-NAA przez zmiany wartości parametru „a”. Porównując czas podania czynnika w sposób ciągły 30 min i frakcyjny 60 min, otrzymano wyraźniejszy charakter zmian po dłuższej ekspozycji na czynnik. Podobnie jak dla aplikacji w sposób frakcyjny  $3 \times 10$  min i  $6 \times 10$  min. Wyraźniejsze zmiany otrzymano po aplikacji  $6 \times 10$  min niż  $3 \times 10$  min. Najmniejsze zmiany dla kompleksów BSA-NAA zaobserwowano po aplikacji czynnika (promieniowania UV oraz promieniowania MF) w sposób frakcyjny  $3 \times 10$  min, a największe zmiany dla BSA-NAA, podob-



Rys. 6. Zmiany współczynnika „a” w wyniku promieniowania BSA-NAA w dawkach fakcyjnych oraz ciągłych dla promieniowania UV oraz dla promieniowania MF

Fig. 6. Changes in the „a” factor as a result of BSA-NAA radiation at factitious and continuous doses for UV radiation and for MF radiation

nie jak dla BSA oraz BSA-Au zaobserwowano po aplikacji promieniowania UV i promieniowania RF w sposób ciągły w czasie 60 min.

Dla wszystkich badanych substancji: BSA, BSA-AU, BSA-NAA, porównując czas podania czynnika w sposób ciągły 30 min i 60 min, otrzymano wyraźniejszy charakter zmian po dłuższej ekspozycji (60 min) na czynnik niż dla 30 min. Podobnie porównując współczynnik „a” dla ekspozycji frakcyjnej ( $3 \times 10$  min i  $6 \times 10$  min) Wyraźniejsze zmiany otrzymano po aplikacji większej dawki ( $6 \times 10$ ) min niż  $3 \times 10$  min.

Na podstawie przedstawionego zestawienia (Rys. 4, Rys. 5, Rys. 6) widać, że dynamika zmian dla BSA oraz kompleksów BSA-Au i BSA -NAA eksponowanych frakcyjnie ( $3 \times 10$  min i  $6 \times 10$  min) jest mniejsza niż dla próbek eksponowanych w trybie ciągłym (30 min i 60 min). Zmiany dla ekspozycji frakcyjnej są łagodniejsze niż dla ekspozycji w trybie ciągłym.

Analiza próbek promieniowanych zarówno w trybie frakcyjnym ( $3 \times 10$  min), jak i w trybie ciągłym (30 min) oraz (60 min), potwierdzają efekt przyspieszonych zmian konformacyjnych w kompleksie białkowym pod wpływem pola elektromagnetycznego z zakresu UV oraz mikrofalowego.

Z literatury wiadomo, że promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu UV może wpływać na łańcuchy polipeptydowe. Badania Chinnathambi [21] potwierdziły wpływ promieniowania UV na BSA i kompleks z antymetabolitem 5-fluorouracil. Michnik [22] opisała wpływ promieniowania UV na zmianę konformacyjną ludzkiej albuminy surowicy niemniej jednak nie doszukano się opisu wpływu dawek frakcyjnych i ciągłych wybrane badane substancje.

Analiza wszystkich przebadanych próbek promieniowanych zarówno w trybie frakcyjnym ( $3 \times 10$  min,  $6 \times 10$  min) jak i w trybie ciągłym (30 min) oraz (60 min), potwierdzają efekt przyspieszonych zmian konformacyjnych w białku i kompleksie białkowym pod wpływem pola elektromagnetycznego z zakresu UV oraz mikrofalowego.

Otrzymane efekty pod wpływem pola elektromagnetycznego, obserwowane jako przyspieszony spadek stabilności badanych substancji: BSA, BSA-Au, BSA-NAA. Mogą one być związane z ze zmianami konformacyjnymi białka i jego kompleksów przyspieszonych przez promieniowanie UV [23] oraz MF.

Podsumowując, aplikacja promieniowania UV oraz mikrofalowego w trybie ciągłym prowadzi do szybszego starzenia się próbki w stosunku do próbki poddanej działaniu promieniowania w sposób frakcyjny. Zmiany konformacyjne zobrazowane poprzez wzrost przewodności są bardziej dynamiczne w próbkach eksponowanych w trybie ciągłym niż w trybie frakcyjnym. Najprawdopodobniej promieniowanie UV i MF podane zarówno w trybie ciągłym jak i w trybie frakcyjnym zwiększa dysocjację roztworów (ilość jonów), zmniejsza oddziaływanie międzyjonowe oraz solwacyjne, co obserwowane jest jako wzrost przewodności. Większe zmiany zaobserwowano dla MF niż dla UV.

### 3.2. Badania czułości na pole elektromagnetyczne z zakresu UV i MF na BSA, BSA-Au, BSA-NAA

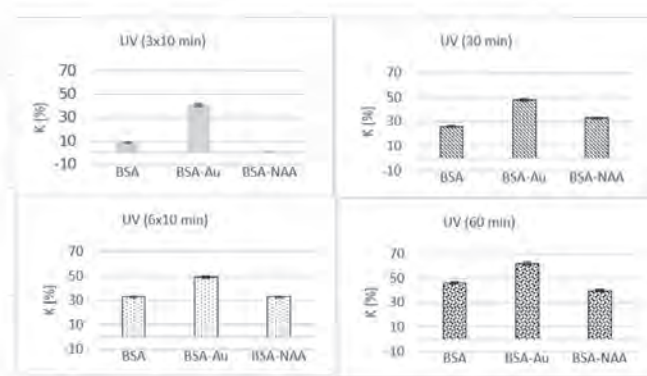
Analizy prezentowane na wykresach (Rys. 7, Rys. 8) miały na celu określenie, które z badanych substancji (BSA, BSA-Au, BSA-NAA) najbardziej reagują na pole elektromagnetyczne z zakresu UV i MF aplikowane w dawkach frakcyjnych ( $3 \times 10$  min,  $6 \times 10$  min) oraz ciągłych (30 min, 60 min). Zbadano zmiany względem próbek kontrolnych. W celach analitycznych wyznaczono czynnik  $K$  na podstawie zależności

$$K = [(a_n/a_0) \cdot 100] - 100 \quad (1)$$

Współczynnik ten wyznaczał względne zmiany procentowe. We wzorze (1)  $a_n$  oznacza współczynnik „a” otrzymany dla danego promieniowanego roztworu, natomiast  $a_0$  oznacza współczynnik „a” dla próbek kontrolnych (bez promieniowania).

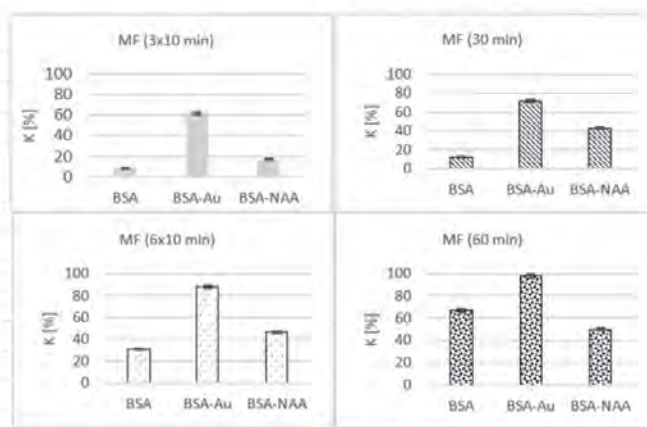
Rysunek 7 przedstawia wartości współczynnika  $K$  dla próbek poddanych ekspozycji na promieniowanie UV. Jak można zauważyć na wykresach, najbardziej czuła na promieniowanie elektromagnetyczne UV okazała się proteina z domieszką nanocząstek złota (BSA-Au). Przyspieszone zmiany konformacyjne pod wpływem pola są największe po ekspozycji na promieniowanie aplikowane 60 min w trybie ciągłym. Mniejszą wrażliwość na pole elektromagnetyczne z zakresu UV wykazały roztwory czystego białka BSA oraz kompleksu BSA-NAA.

Analizując wartości współczynnika  $K$  (Rys. 8) dla próbek poddanych ekspozycji promieniowanie MF widać, że podobnie jak w przypadku ekspozycji na pole elektromagnetyczne z zakresu UV, tak i w przypadku ekspozycji na pole elektromagnetyczne z zakresu MF, największą wrażliwość na ekspozycję wykazały roztwory białka z nanocząsteczkami złota (BSA-Au), ekspozycja ciągła (60 min) wywołała największe zmiany. Mniej



Rys. 7. Wartości współczynnika  $K$  dla próbek poddanych ekspozycji na promieniowanie UV

Fig. 7. K-factor values for samples exposed to UV radiation



Rys. 8. Wartości współczynnika  $K$  dla próbek poddanych ekspozycji na promieniowanie MF

Fig. 8. K-factor values for samples exposed to MF radiation

czułe na pole elektromagnetyczne z zakresu MF okazały się BSA oraz BSA-NAA.

Porównując zmiany wywołane promieniowaniem UV oraz promieniowaniem MF, otrzymano większe zmiany dla próbek poddanych ekspozycji (zarówno ciągłej 30 min, 60 min jak i frakcyjnej  $3 \times 10$  min,  $6 \times 10$  min) promieniowaniu MF. Najprawdopodobniej wpływ na otrzymany efekt na długość fali, która w przypadku MF jest krótsza niż w przypadku promieniowania UV.

## 4. Podsumowanie

Podsumowując, w prezentowanej pracy za pomocą konduktometrii zbadano wpływ promieniowania elektromagnetycznego z zakresu UV oraz MF aplikowanego w dawkach frakcyjnych ( $3 \times 10$  min,  $6 \times 10$  min) oraz ciągłych (30 min, 60 min) na stabilność proteiny BSA będącej składnikiem warstw receptorowych w biosensorach oraz jej kompleksów BSA-Au oraz BSA-NAA. Przeprowadzone analizy wykazały destabilizujący wpływ na proteinę promieniowania zarówno z zakresu UV jak i MF zarówno po aplikacji promieniowania w sposób ciągły jak i frakcyjny. Większe zmiany zauważono po aplikacji promieniowania w sposób ciągły niż w sposób frakcyjny. Większe zmiany destabilizacyjne wykazało promieniowanie MF niż UV.

Największą czułość na pole elektromagnetyczne zarówno z zakresu UV, jak i MF wykazały mieszaniny BSA-Au. Zmiany konformacyjne proteiny i jej kompleksów zostały wytłumaczone zmianą uporządkowania łańcucha polipeptydowego wywołaną przegrupowaniem cząsteczek w lokalnym środowisku badanego roztworu, zmianą w strukturze drugorzędowej białka, wzrostem ilości konformacji helisy i zmniejszenie struktury arkusza beta, tworzeniem agregatów białkowych prowadzących do denaturacji

białka, procesami destrukcyjnymi w aminokwasach aromatycznych białka, zmianami odległości w łańcuchu polipeptydowym, osłabieniem stabilności białka pod wpływem rozpuszczalnika, reorganizacją wody oraz zmianami oddziaływań elektrostatycznych van der Waalsa. Naturalne zmiany konformacyjne zachodzące w proteinie i jej kompleksach wraz z czasem następują szybciej pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego z zakresu UV i MF.

## Bibliografia

- Moroń Z., *Pomiary przewodności elektrycznej cieczy przy małych częstotliwościach*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- Lubert K.-H., Kalcher K., *History of Electroanalytical Methods*, "Electroanalysis", Vol. 22, No. 17–18, 2010, 1937–1946, DOI: 10.1002/elan.201000087.
- Stock J.T., *A Short Course on the History of Analytical Chemistry and the Related Sciences*, "Journal of Chemical Education", Vol. 54, No. 10, 1977, 635–637.
- Braun R.D., *Chemical Analysis*. Encyclopedia Britannica, Inc, 2015, Web. 2015.
- Harned H.S., Owen B., *The physical chemistry of electrolytic solutions*. Reinhold Publishing Corporation, 1967.
- Kłos-Witkowska A., Martsenyuk V., *Stabilność komponenta sieciującego warstwę receptorową biosensora po dodaniu nanocząstek złota*. „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 25, Nr 1, 2021, 49–52, DOI: 10.14313/PAR\_239/49.
- Mosińska L., Fabisiak K., Paprocki K., Kowalska M., Popielarski P., Szybowicz M., Stasiak A., *Diamond as a transducer material for the production of biosensors*. „Przemysł Chemiczny”, Vol. 92, No. 6, 2013, 919–923.
- Sirisha V.L., Jain A., Jain A., *Enzyme immobilization an overview on methods, support material, and applications of immobilized enzymes*. "Advances in Food and Nutrition Research", Vol. 79, 2016, 179–211, DOI: 10.1016/bs.afnr.2016.07.004.
- Martsenyuk V., Kłos-Witkowska A., Sverstiuk A., *Stability, bifurcation and transition to chaos in a model of immunosensor based on lattice differential equations with delay*. "Electronic Journal of Qualitative Theory of Differential Equations", No. 27, 2018, 1–31, DOI:10.14232/ejqtde.2018.1.27.
- Jin X., Cai A., Xu T., Zhang X., *Artificial intelligence biosensors for continuous glucose monitoring*. "Interdisciplinary Materials", Vol. 2, Issue 2, 2023, 290–307, DOI: 10.1002/idm2.12069.
- Martsenyuk V., Kłos-Witkowska A., *Computation Model of Cyber-Physical Immunosensor System*, "IEEE Access", Vol. 7, 2019, 62325–62337, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2915946.
- Sumitha M., Xavier T., *Recent advances in electrochemical biosensors – A brief review*. "Hybrid Advances", Vol. 2, 2023, DOI: 10.1016/j.hybadv.2023.100023.
- Kłos-Witkowska A., *Biosensory*. „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 19, Nr 3, 2015, 37–40, DOI: 10.14313/PAR\_217/37.
- Soldatkina O.V., Soldatkin O.O., Velychko T.P., Prilipko V.O., Kuibida M.A., Dzyadevych S.V., *Conductometric biosensor for arginine determination in pharmaceuticals*, „Bioelectrochemistry”, Vol. 124, 2018, 40–46, DOI: 10.1016/j.bioelechem.2018.07.002.
- Martsenyuk V., Kłos-Witkowska A., Dzyadevych S.V., Sverstiuk A., *Nonlinear Analytics for Electrochemical Biosensor Design Using Enzyme Aggregates and Delayed Mass Action*, "Sensors", Vol. 22, No. 3, 2022, 1–17, DOI: 10.3390/s22030980.
- Li Y., Su J, Cavaco-Paulo A., *Laccase-catalyzed cross-linking of BSA mediated by tyrosine*. "International Journal of Biological Macromolecules", Vol. 166, 2021, 798–805, DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.10.237.
- Li Y., Han R., Chen M., Zhang L., Wang G., Luo X., *Bovine Serum Albumin-Cross-Linked Polyaniline Nanowires for Ultralow Fouling and Highly Sensitive Electrochemical Protein Quantification in Human Serum Samples*. "Analytical Chemistry", Vol. 93, No. 9, 2021, 4326–4333, DOI: 10.1021/acs.analchem.1c00089.
- Michnik A., Michalik K., Drzazga Z., *Effects of UVC radiation on conformational restructuring of human serum albumin*. "Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology", Vol. 90, No. 3, 2008, 170–178, DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2007.12.007.
- Bolkowski S., *Elektrotechnika*, Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1998.
- Kłos-Witkowska A., *Biosensory odpowiedzi na potrzeby współczesnego społeczeństwa*. Trendy i rozwiązania technologiczne: odpowiedź na potrzeby współczesnego społeczeństwa. Tom 1 (red.: M. Maciąg, K. Maciąg), 2017, 143–151.
- Chinnathambi S., Karthikeyan D., Hanagatan N., Aruna P., Ganesan S., *Effect of Moderate UVC Irradiation on Bovine Serum Albumin and Complex with Antimetabolite 5-Fluorouracil-Fluorescence Spectroscopic and Molecular Modelling Studies*. "International Journal of Spectroscopy, 2015, DOI: 10.1155/2015/315764.
- Michnik A., Michalik K., Drzazga Z., *Study of stability of bovine serum albumin at different pH*. "Journal of Thermal Analysis and Calorimetry", Vol. 80, 2005, 399–406, DOI: 10.1007/s10973-005-0667-9.
- Gospodarczyk W., Szutkowski K., Kozak M., *Interaction of Bovine Serum Albumin (BSA) with Novel Gemini Surfactants Studied by Synchrotron Radiation Scattering (SR-SAXS), Circular Dichroism (CD), and Nuclear Magnetic Resonance (NMR)*. "Journal of Physical Chemistry B", Vol. 118, No. 29, 2014, 8652–8661, DOI: 10.1021/jp5047485.

# Studies of the Effect of Electromagnetic Radiation on Biosensor Matrix Components

**Abstract:** In this study, the conformational changes of BSA protein and its complexes (BSA-Au and BSA-NAA) under UV and MF radiation applied in fractional doses ( $3 \times 10$  min and  $6 \times 10$  min) and continuously (30 min, 60 min) were investigated by means of conductivity changes. A comparative analysis of the effect of UV and microwave radiation in continuous and fractional doses on BSA, BSA-Au, BSA-NAA was performed, and the sensitivity to UV and MF electromagnetic fields of the tested substances was analysed. The effect of accelerated conformational changes under the influence of UV and MF electromagnetic field was proved. The influence of the factors on the stability of BSA and its complexes was shown to depend on: the type of agent, the method of its application and the exposure time. The most sensitive to the electromagnetic field turned out to be the complex BSA-Au.

**Keywords:** biosensor, BSA, MF, UV, conductivity, stability biosensor, BSA, MF, UV, conductivity, stability

## dr Aleksandra Kłos-Witkowska

awitkowska@ath.bielsko.pl  
ORCID: 0000-0003-2319-5974

Adiunkt w Katedrze Informatyki i Automatyki na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej. Zainteresowania naukowe: sensory i biosensory.



## prof. dr hab. Vasyl Martsenyuk

vmartsenyuk@ath.bielsko.pl  
ORCID: 0000-0001-5622-1038

Profesor w Katedrze Informatyki i Automatyki na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej. Zainteresowania naukowe: biosensor, systemy dynamiczne, informatyka medyczna.

