

ANNALES
UNIVERSITATIS MARIAE CURIE-SKŁODOWSKA
LUBLIN — POLONIA

VOL. XLV, 2

SECTIO AAA

1990

Instytut Fizyki UMCS

Władysław BULANDA

Piroelektryczność tkanek roślinnych

Pyroelectricity of Plant Tissues

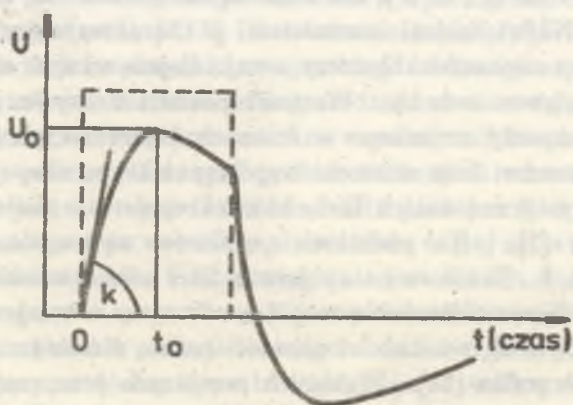
Badania eksperymentalne wykazały, że wiele struktur roślinnych charakteryzuje się własnościami piroelektrycznymi. Stwierdzono, że efekt piroelektryczny występuje między innymi w zewnętrznej tkance ziarna, korzeni, pędów, liści oraz wici, w skórkach owoców, korze, ścianach zielonych alg, nasionach, we floemie i ksylemie drzew, a także w mikrotubulach. Rezultaty badań pozwalają wnioskować, że piroelektryczność roślin związana jest z uporządkowaniem trwałych momentów dipolowych molekul, wchodzących w skład danej struktury roślinnej. W świecie zwierzęcym własności piroelektryczne występują głównie w strukturach kolagenowych, keratynowych i chitynowych [7]. O własnościach piroelektrycznych roślin decydują ich składniki celulozowe, niektóre lipidy oraz białka strukturalne. Celulozowe składniki roślin, występujące zarówno w ścianach komórkowych jak i we floemie oraz ksylemie, wykazują — podobnie jak struktury kolagenowe u zwierząt — uporządkowanie fibrylarne, stwierdzone metodami dyfrakcji promieni X i mikroskopii elektronowej [3,7,10,11,17]. Pomiar dyfrakcyjne pokazały, że inne polisacharydy występujące w ścianach komórek również charakteryzują się uporządkowanym ułożeniem swoich molekul [17]. Własności piroelektryczne struktur zawierających celulozę są rezultatem orientacyjnego uporządkowania dipoli hydroksylowych OH [3,7]. W epidermie liści i zewnętrznych tkankach ziaren własności piroelektryczne wynikają zarówno z obecności takich składników proteinowych, w których występują znaczne ilości polarnych aminokwasów (aspargina, arginina, lizyna) jak

i z powodu zawartych tam polarnych lipidów, np. lecytyny [5,14,15]. Białka strukturalne decydują również o polarnych własnościach mikrotubuli [3,6].

Pomiary własności piroelektrycznych tkanek roślinnych wykonywane są zarówno w próbkach pobieranych z roślin o prostej strukturze (głony) jak i na próbkach pochodzących z roślin o strukturze zróżnicowanej (zboża, paprocie, bluszcze, krzewy, drzewa). Znaczna część pomiarów przeprowadzona jest na małych, cienkich próbkach, o powierzchni około 1 cm^2 i grubościach zawartych w przedziale: 0,02–0,2 mm [2,5,4,15,22]. Wykonywane są również pomiary na próbkach dużych, o powierzchni do 5 cm^2 , które preparowane są z całych obiektów roślinnych, np z liści, bezpośrednio po ich obcięciu [22]. Niektóre próbki, między innymi preparowane z nasion lub kory, umieszcza się w komorze pomiarowej bez poddawania ich procesowi suszenia. Inne próbki są przed pomiarami suszone w powietrzu o temperaturze pokojowej, przez kilkanaście minut [2,15]. Preparowanie próbek musi być wykonywane z należytą ostrożnością, aby nie doprowadzić do uszkodzenia ich oryginalnej struktury. Kontrolne pomiary oporu elektrycznego próbek przeprowadzane w trakcie eksperymentów piroelektrycznych pokazują, że zachowuje on stałą wartość, co świadczy iż eksperymenty te nie wywołują zmian w badanych tkankach [14,15]. W pomiarach własności piroelektrycznych tkanek roślin stosuje się przeważnie elektrody miedziane dołączone do próbek srebrną pastą [5,14,15] lub elektrody w formie zawiesiny grafitu, która kontaktuje się z częścią pomiarową za pomocą folii aluminiowej i srebrnej pasty [22]. Próbki wraz z elektrodami mocowane są na podstawkach teflonowych, które umieszcza się w komorze pomiarowej aparatury.

Pierwsze pomiary własności piroelektrycznych roślin wykonywane były według metody S.B. Langa i F. Steckela, w której próbkę ogrzewa się prądem elektrycznym za pomocą taśmy oporowej, a chłodzi poprzez kontakt z prętem mosiężnym, zanurzonym w lodzie lub ciekłym azocie [2,13]. W późniejszych pomiarach stosowano głównie metodę M. Simhony'ego i A. Shaulova ogrzewania próbki impulsami światła i analizy otrzymanych krzywych, przedstawiających zmiany napięcia piroelektrycznego w czasie [4,5,14,15,19,20,22]. W metodzie tej stosowane są najczęściej prostokątne impulsy światła, otrzymane z lampy ksenonowej, halogenowej lub lasera. Czas trwania impulsów zawarty jest w przedziale od 0,01 s do 1 s, co w znacznej mierze jest uzależnione od stałej czasowej obwodu pomiarowego. Przy krótkich impulsach światła ($t = 0,01 \text{ s}$) próbki ogrzewają się średnio o $0,2^\circ\text{C}$, podczas gdy przy impulsach trwających 1 s, zmiana temperatury próbki osiąga 16°C . Ze względów biologicznych badania piroelektryczności roślin przeprowadzane są w dosyć wąskim zakresie temperatur od 20°C do 50°C i jedynie pomiary wykonywane na ziarnach zbóż w cyklach

grzanie—chłodzenie, bywają realizowane w szerszym zakresie temperatur, a mianowicie od -25°C do $+40^{\circ}\text{C}$ [5]. Do pomiarów temperatury używa się przeważnie termometrów termoelektrycznych lub piroelektrycznych z cienkim dyskiem turmalinowym jako czujnikiem [4]. Stwierdzono, że cienkie próbki nagrzewają się jednakowo na całej grubości, dzięki czemu nie występują problemy związane z gradientem temperatury [5]. W metodzie ogrzewania radiacyjnego stosowane są komory pomiarowe zaopatrzone w kwarcowe okienko, służące do oświetlania próbek wiązką światła. Niektóre pomiary z próbkami suszonymi wykonywane są po częściowym opróżnieniu komory pomiarowej z powietrza [15]. Impulsy napięcia piroelektrycznego są w większości pomiarów wzmacniane i rejestrowane na ekranie oscylografu.



Ryc. 1. Kształt napięcia piroelektrycznego otrzymanego po oświetleniu próbki prostokątnym impulsem światła (linia przerywana) [19,22]

Sygnal napięcia piroelektrycznego $U(t)$, generowany podczas impulsowego ogrzewania próbek roślinnych, ma złożony charakter będący rezultatem jego zależności zarówno od właściwości samych próbek, jak i parametrów obwodu pomiarowego i impulsu ogrzewającego (Ryc. 1). O przebiegu napięcia piroelektrycznego decydują w istotny sposób stałe czasowe układu: elektryczna $\tau_E = RC$ i termiczna $\tau_T = c_T/G_T$, gdzie R jest oporem przedwzmacniacza, C — pojemnością elektryczną próbki, c_T — pojemnością cieplną próbki a G_T — termicznym przewodnictwem próbki do otoczenia. Współczynnik piroelektryczny p może być obliczany na podstawie niektórych parametrów krzywych $U(t)$ takich, jak: nachylenie k początku krzywej, maksymalna wartość U_0 napięcia piroelektrycz-

nego, czas t_0 narastania tego napięcia do wartości maksymalnej [5,15,19,20, 21,22]. Obliczenia te wymagają ponadto przeprowadzenia dodatkowych pomiarów gęstości i ciepła właściwego badanych próbek. Najdokładniejsze wartości p są otrzymywane przez dopasowanie wyników eksperymentalnych do funkcji przedstawiającej zależność $U(t)$, przeprowadzone metodą najmniejszych kwadratów [15]. Główną przyczyną odstępstw punktów pomiarowych od krzywych teoretycznych okazało się niejednorodne ogrzewanie próbek, wynikające z nierówności występujących na ich powierzchniach [5].

Na podstawie pomiarów wykonywanych obu przedstawionymi metodami na próbkach przygotowanych z różnych struktur wielu gatunków roślin, uzyskano wartości współczynników piroelektrycznych p zawarte w stosunkowo wąskim przedziale: $3,2 \cdot 10^{-13} \text{ C/cm}^2\text{K} - 19 \cdot 10^{-13} \text{ C/cm}^2\text{K}$ ($3,2 \text{ nC/m}^2\text{K} - 19 \text{ nC/m}^2\text{K}$), dla zakresu temperatur od 20°C do 30°C [2,5,14,15,22]. Największymi wartościami p charakteryzuje się epiderma liści, szczególnie u sagowców i bluszczy, a najmniejszą wartość współczynnika stwierdzono w skórcie owoców. Wartości pośrednie współczynnika piroelektrycznego p zostały zmierzone w ścianach komórkowych glonów. Zauważone u sagowców duże wartości współczynnika p , okazują się ogólną cechą charakterystyczną takich liści, których epiderma zawiera dużo wosku lub kutyny [2]. Na podstawie pomiarów wykonywanych metodą M. Simhony'ego-A. Shaulova na epidermie liści palmopodobnego sagowca *Encephalartos villosus* obliczono wartość p , równą — w temperaturze 25°C — $(13,4 \pm 4) \text{ nC/m}^2\text{K}$, co stanowi wartość średnią dla siedmiu próbek pobranych z trzech roślin [14]. W innych pomiarach przeprowadzonych na próbkach z liści tego sagowca, otrzymano taką samą wartość współczynnika p równą $(12,9 \pm 4,3) \text{ nC/m}^2\text{K}$ w przypadku ogrzewania zewnętrznej, nie naruszonej powierzchni liścia oraz znacznie mniejszą wartość p wynoszącą $(5,5 \pm 2,3) \text{ nC/m}^2\text{K}$, gdy eksponowano wewnętrzną część liścia po usunięciu z niej skalpelem zewnętrznej części epidermy [15]. Większe od wymienionych wartości współczynników piroelektrycznych otrzymywane są w pomiarach przeprowadzonych w krótkim czasie po odcięciu liści od rośliny [22]. Dodatkowo stwierdzono, że dolna powierzchnia liści badanych roślin (*Encephalartos villosus* i *Rhododendron catawbiense*) charakteryzuje się większą wartością współczynnika piroelektrycznego (odpowiednio $60 \text{ nC/m}^2\text{K}$ i $150 \text{ nC/m}^2\text{K}$) niż powierzchnia górna (20 nC/m^2 i $30 \text{ nC/m}^2\text{K}$). W pomiarach tych potwierdzono zmniejszenie się wartości współczynników piroelektrycznych u tych liści, w których zdzierana jest jedna warstwa epidermy. Dla dolnej i górnej powierzchni dużych próbek liści *Encephalartos villosus* współczynniki piroelektryczne ulegają zmniejszeniu odpowiednio do wartości 20 nC/m^2 i $5 \text{ nC/m}^2\text{K}$ [22].

Przedstawione wartości współczynników piroelektrycznych, otrzymane dla próbek roślinnych, są o dwa do trzech rzędów wielkości mniejsze od współczynnika piroelektrycznego ($p = 4 \cdot 10^3 \text{ nC/m}^2\text{K}$) typowego piroelektryka nieorganicznego jakim jest turmalin. Kolejne badania próbek pochodzenia roślinnego doprowadziły do wykrycia wyjątkowo silnego efektu piroelektrycznego, występującego w całych ziarnach i w ściankach ziaren zbóż [5]. Zmierzone w nich wartości współczynników piroelektrycznych p są rzędu $10^2 \text{ nC/m}^2\text{K} - 10^3 \text{ nC/m}^2\text{K}$, więc są zbliżone do wartości współczynnika p turmalinu. Wykazują one ponadto istotną zależność od temperatury, podobnie jak stwierdzono to w syntetycznym polimerze PVF₂ i nylonie [8,16]. Zmiana wartości p , zmierzona dla danego ziarna w przedziale temperatur od -20°C do $+20^\circ\text{C}$, przekracza jeden rząd wielkości. Dodatkowo stwierdzono, że zarówno dla ziaren jak i dla epidermy liści temperaturowa zależność współczynnika piroelektrycznego uzyskana w cyklu grzanie—oziębianie charakteryzuje się histerezą [5,15]. Powtarzanie takich cykli bezpośrednio jeden po drugim daje bardzo zbliżone przebiegi zależności współczynnika p od temperatury, natomiast ziarna jednego rodzaju zboża mogą znacznie różnić się (nawet dziesięciokrotnie) wartościami współczynników piroelektrycznych. Otrzymany w pomiarach innych próbek roślinnych rozrzut wartości p nie jest tak duży jak w przypadku ziaren. Dla próbek z liści rododendronu i sagowca stwierdzono, że wartość p nie różni się więcej niż o 30% od wartości średniej, co dla materiału biologicznego nie jest różnicą dużą [22]. Rozrzut wartości p częściowo spowodowany jest różnicami samych próbek i może wynikać na przykład z różnej ich wilgotności, a częściowo jest rozrzutem charakteryzującym obiekty typu biologicznego, wywołanym między innymi procesem selekcji badanych roślin. Rozrzut biologiczny można zauważyć w wynikach eksperymentów przeprowadzonych na liściach bluszczu i skórce jabłka, których próbki starannie przygotowano w jednakowy sposób i dobierano pod względem jednakowej wartości oporu elektrycznego [2].

Grubość warstwy tkanki roślinnej, w której wytwarzany jest sygnał piroelektryczny można oszacować poprzez pomiary termicznej stałej czasowej τ_T . Eksperymenty wykonywane na próbkach z liści sagowca *Encephalartos villosus* pokazały, że zewnętrzna warstwa liści charakteryzuje się znacznie mniejszą wartością τ_T (0,04 s) niż odsłonięta warstwa ($\tau_T = 0,81 \text{ s}$), a jednocześnie wytwarzany jest w niej znacznie silniejszy efekt piroelektryczny [15]. Ponieważ stała czasowa τ_T jest proporcjonalna do grubości warstwy, która jest ogrzewana i w której generowany jest sygnał piroelektryczny, powyższy rezultat pozwala wnioskować, że warstwa piroelektryczna w liściach jest cienka i leży bliżej ich powierzchni zewnętrznej niż wewnętrznej. Piroelektrycznym składnikiem takiej warstwy mogą być polarne lipidy.

Pomiary efektu piroelektrycznego w ścianach komórkowych roślin niższych, na przykład glonów, wykazały występowanie w nich trwałej polaryzacji w dwóch prostopadłych kierunkach [2,3]. Polaryzacja podłużna skierowana jest w stronę wierzchołka rośliny, a polaryzacja poprzeczna zwrócona jest od powierzchni rośliny do jej wnętrza. U roślin wyższych, szczególnie w pniach różnych gatunków drzew (buk, wierzba, sosna, świerk, jodła) stwierdzono występowanie warstw o przeciwnych kierunkach polaryzacji podłużnej i poprzecznej [2]. W warstwie łyka (floem) polaryzacja podłużna skierowana jest ku dołowi pnia, a polaryzacja poprzeczna na zewnątrz, podczas gdy w warstwie drewna i kory występują przeciwne do powyższej kierunki polaryzacji podłużnej i poprzecznej. We wszystkich zewnętrznych roślinnych strukturach okrywających, takich jak epiderma liści, kora, pokrywa nasion, skórka owoców, stwierdzony jest jeden stały kierunek polaryzacji, prostopadły do powierzchni i zwrócony do wnętrza rośliny. Pomiary wykonywane na próbkach z tkanek okrywających nasiona (między innymi dyni, fasoli, słonecznika, jabłka), które stopniowo ścierano zarówno od strony zewnętrznej jak i wewnętrznej do grubości około 0,05 – 0,07 mm pokazały, że w przeciwieństwie do epidermy liści, polaryzacja wymienionych próbek ma charakter objętościowy i występuje w całym obszarze między powierzchnią wewnętrzną i zewnętrzną badanych struktur [2].

Badaniom efektu piroelektrycznego w tkankach roślinnych towarzyszą niejednokrotnie dodatkowe pomiary, na podstawie których można ustalić, że otrzymywane podczas doświadczeń impulsy elektryczne mają własności charakterystyczne dla tego efektu. Stwierdzono, że wytworzone impulsy wykazują właściwą dla napięć piroelektrycznych zmianę znaku, występującą przy przejściu od ogrzewania do oziębiania próbek, a także przy ich obrocie o 180° [2]. Na piroelektryczny charakter sygnałów napięciowych generowanych podczas impulsowego ogrzewania próbek wskazują: a) zależność wielkości generowanego napięcia od szybkości zmiany temperatury ($\Delta T/\Delta t$), a nie od samej zmiany temperatury (ΔT), b) symetryczna odwracalność impulsu napięcia przy włączeniu i wyłączeniu impulsu światła, c) brak wpływu oporu wejściowego układu pomiarowego na wytwarzane napięcie [22]. Porównawcze pomiary spektralne, wykonane za pomocą fotodiody, wykluczają fotoelektryczny charakter napięć wytwarzanych podczas impulsowego oświetlania próbek [14,15]. Na termiczny charakter tych napięć wskazuje również korelacja między wartościami współczynnika p i termicznej stałej czasowej τ_T otrzymana w pomiarach wykonanych na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni liści [15].

Istotne informacje dotyczące mechanizmu piroelektryczności w roślinach otrzymano w wyniku badań przeprowadzonych na próbkach epidermy liści

Encephalartos villosus umieszczonych w stałym polu elektrycznym [14,15]. Przyłożenie w poprzek próbki napięcia w zakresie od -30 V do $+30$ V prowadzi do uzyskania pól elektrycznych o natężeniu rzędu kilkunastu kV/cm. Pomiar wykazały, że wraz ze wzrostem natężenia pola obserwuje się znaczny, 10. a nawet 50. krotny liniowy wzrost napięcia sygnału piroelektrycznego. Dla jednej z próbek napięcie piroelektryczne generowane bez pola miało wartość 85 mV, która wzrosła do 720 mV dla pola o natężeniu 2,7 kV/cm, zwróconego zgodnie z kierunkiem napięcia piroelektrycznego, a zmalała do -595 mV przy przeciwnym zwrocie zewnętrznego pola elektrycznego [15]. Badania spektralne pozwoliły ustalić, że obserwowane napięcia mają charakter piroelektryczny. Przebieg indukowanych polem zmian impulsów piroelektrycznych jest we wszystkich próbkach jednakowy, natomiast wielkości tych zmian są różne dla poszczególnych próbek. Można zauważyć, że próbki, które charakteryzują się większą wartością napięć piroelektrycznych wytwarzanych bez pola, silniej reagują na przyłożone pole elektryczne, co w niektórych przypadkach prowadzi do indukowania napięć piroelektrycznych rzędu woltów. Pomiar wykonywane w różnych temperaturach (10°C , 25°C , 45°C) pozwalają zauważyć, że oddziaływanie zewnętrznego pola elektrycznego nie zależy od temperatury próbki. Rozszerzenie pomiarów na badania próbek umieszczonych w polu elektrycznym o dużym natężeniu, dochodzącym do $18,2$ kV/cm, doprowadziło do ustalenia, że epiderma badanych liści nie ma własności ferroelektrycznych [14,15]. W znanych substancjach ferroelektrycznych pola elektryczne o tak dużym natężeniu powodują odwrócenie polaryzacji domen, natomiast w epidermie liści wyłączenie pola wywołuje natychmiastowy powrót napięcia piroelektrycznego do początkowej, niskiej wartości. Otrzymywane rezultaty wskazują, że sygnał piroelektryczny wytwarzany w próbkach znajdujących się w polu elektrycznym jest sumą sygnału powstającego bez pola i sygnału indukowanego polem, który zwiększa się wraz ze wzrostem natężenia pola elektrycznego. Analiza teoretyczna wskazuje, że efekt indukowany jest nieliniowym efektem piroelektrycznym drugiego rzędu [15]. Współczynnik p' , który określa ten efekt, określany jest jako pochodna podstawowego współczynnika piroelektrycznego p względem natężenia pola elektrycznego. Wzajemna zależność tych dwóch wielkości wynika z temperaturowej zmiany stałej dielektrycznej. Dane doświadczalne wykazały dużą wartość (około 100) stałej dielektrycznej badanych próbek oraz pozwalają stwierdzić, że zmienia się ona wraz ze zmianami temperatury w przedziale od $0,08$ K $^{-1}$ do $0,04$ K $^{-1}$ [14,15]. Jednocześnie zauważono, że napięcie piroelektryczne indukowane polem elektrycznym jest znacznie większe wtedy, gdy oświetlana jest zewnętrzna powierzchnia liścia. Wyniki eksperymentów wskazują za-

tem, że indukowany efekt piroelektryczny powstaje w cienkiej, zewnętrznej warstwie epidermy liścia, przypuszczalnie w złożach wosku lub polarnych lipidach, które byłyby odpowiedzialne za większą wartość stałej dielektrycznej i większą jej zmienność temperaturową w stosunku do substancji znajdujących się wewnątrz liścia. Indukowany polem efekt piroelektryczny został zaobserwowany także w innych substancjach o dużych wartościach stałej dielektrycznej, takich jak syntetyczny polimer PVF_2 [12,18] i ferroelektryk $BaTiO_3$ [14]. Stwierdzono, że pole elektryczne może również indukować efekt piezoelektryczny w substancjach izotropowych, ale nie jest to efekt uważany za istotny przy wyjaśnianiu indukowanej piroelektryczności w tkankach roślinnych [23].

Pomiary wykonywane na próbkach z liści *Enaphalartos villosus* wskazały na występowanie dodatkowego efektu piroelektrycznego, który spowodowany jest zmianami ciśnienia w komorze pomiarowej [15]. Zmiany ciśnienia oddziałują również na wielkość efektu piroelektrycznego w błonach polimerowych, co zostało zauważone podczas pomiarów wykonywanych na błonach z PVF_2 [9]. Redukcja ciśnienia w komorze pomiarowej do wartości 0,05 mmHg wywołuje istotną — od kilkunastu do kilkudziesięciu procent — zmianę wartości współczynnika piroelektrycznego p . Wartość współczynnika p rośnie gdy ogrzewana jest zewnętrzna powierzchnia liści, natomiast maleje przy ogrzewaniu powierzchni wewnętrznej. Usuwanie powietrza z komory wywołuje w próbce dwa rodzaje naprężeń, które oddziałują poprzez efekt piezoelektryczny na wielkość generowanych napięć piroelektrycznych. Jedno naprężenie jest typu hydrostatycznego i wynika bezpośrednio ze spadku ciśnienia w komorze pomiarowej, natomiast drugi rodzaj naprężenia jest rezultatem zginania próbki, spowodowanego rozszerzaniem się pęcherzyków powietrza w paście srebrnej, mocującej próbkę do elektrody. Wpływ naprężenia na efekt piroelektryczny opisywany jest naprężeniowym współczynnikiem piroelektrycznym drugiego rzędu, określanym jako pochodna współczynnika p względem naprężenia i wynikającym z temperaturowej zależności stałych piezoelektrycznych badanych próbek. Rezultaty badań efektu piroelektrycznego indukowanego naprężeniami również sugerują, że obszarem piroelektrycznym w liściu jest cienka warstwa położona w pobliżu jego zewnętrznej powierzchni.

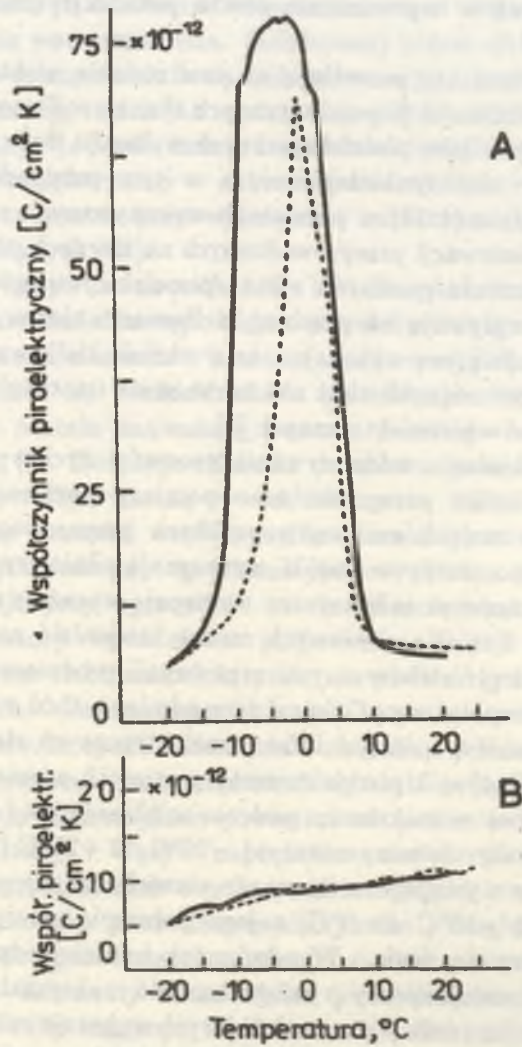
Badania efektu piroelektrycznego w ziarnach zbóż wykazały, że rezultaty otrzymane dla próbek preparowanych ze ścianek ziarna niewiele różnią się od wyników uzyskiwanych dla całych ziaren. Wynik tych doświadczeń wskazuje, że również w ziarnach własności piroelektryczne występują głównie w ich tkankach zewnętrznych, które zawierają duże ilości polarnych lipidów i aminokwasów [5]. Kolejne pomiary, w wyniku których stwier-

dzono występowanie własności piroelektrycznych w okrywach nasion dyni, słonecznika, fasoli oraz w ściankach owoców jabłoni i pomidorów są dalszym potwierdzeniem wniosku o podstawowym znaczeniu zewnętrznych warstw struktur roślinnych w wytwarzaniu efektu piroelektrycznego w tkankach roślin [2].

Uzyskiwane rezultaty pozwalają na analizowanie niektórych biologicznych aspektów własności piroelektrycznych tkanek roślinnych. Otrzymane wartości współczynników piroelektrycznych wykazują duży rozrzut, ogólnie charakteryzujący obiekty biologiczne, a w tym przypadku występujący szczególnie wyraźnie (1:10) w pomiarach wykonywanych na ziarnach zbóż [5]. W wyniku obserwacji przeprowadzonych na ziarnach przez okres dwóch tygodni po ukończeniu pomiarów efektu piroelektrycznego stwierdzono, że pomiary te nie wpływają na przebieg kiełkowania ziaren [5]. Zauważono również relację odwrotną wykazując, że w okresie kiełkowania nasion dyni, fasoli, słonecznika i różnych zbóż nie zauważa się istotnych zmian wartości ich współczynników piroelektrycznych [2].

W celu przebadania oddziaływania procesów życiowych na własności piroelektryczne roślin przeprowadzono pomiary porównawcze na całych liściach oraz na małych suszonych próbkach preparowanych z epidermy liści. Stwierdzono, że żywe próbki wytwarzają silniejszy sygnał piroelektryczny, ale własności piroelektryczne występują wyraźnie także w próbkach martwych [22]. U roślin zbożowych można stwierdzić powiązanie między ich własnościami piroelektrycznymi a pewnymi procesami fizjologicznymi, zależnymi od temperatury. Ozime i jare odmiany zbóż wykazują zupełnie odmienną zależność współczynników piroelektrycznych ziaren od temperatury [4,5]. Współczynnik piroelektryczny p ozimych odmian pszenicy i żyta osiąga wyraźne i ostre maksimum podczas oziębiania jak i ogrzewania badanych próbek w zakresie temperatur od -20°C do $+25^{\circ}\text{C}$ (Ryc. 2A). Maksimum wartości p występuje w obszarze niewielkich temperatur ujemnych, w przedziale od -10°C do 0°C , a jego położenie zależy od stopnia odporności odmiany na mróz. W odmianach bardziej odpornych na mróz, współczynnik piroelektryczny p osiąga wartość maksymalną w niższej temperaturze. Współczynnik p ziaren zbóż jarych wykazuje całkowicie odmienną zależność temperaturową. Dla tej odmiany zbóż obserwuje się ciągłe zmniejszanie się wartości współczynnika piroelektrycznego, postępujące w trakcie obniżania temperatury ziaren od $+20^{\circ}\text{C}$ do -25°C (Ryc. 2B). Z przedstawionych zależności wynika, że pomiary piroelektryczne mogą stanowić fizyczną metodę odróżniania ziaren ozimych i jarych odmian zbóż, które we wczesnym stadium rozwoju nie wykazują istotnych różnic morfologicznych.

W strukturach roślinnych stwierdzono, że — podobnie jak w struktu-



Ryc. 2. Porównanie temperaturowych zależności współczynników piroelektrycznych ziaren żyta: A - odmiana ozima, B - odmiana jara, — oziębianie próbki, - - - ogrzewanie próbki

rach zwierzęcych — ich podłużny wzrost następuje w kierunku wektora polaryzacji [2,3]. Fakt ten można objaśnić uporządkowaniem dipoli molekuł, występującym w trakcie wzrostu roślin i polegającym na ustawieniu się trwałych momentów dipolowych molekuł w kierunku wzrostu. Pomimo takiego uporządkowania próby wykrycia oddziaływania pola elektrycznego na szybkość wzrostu roślin wyższych skazane są na niepowodzenie. W roślinach tych występują dwa przeciwne kierunki polaryzacji, jako że wektory podłużnej oraz poprzecznej polaryzacji zarówno w ksylemie jak i we floemie są skierowane antyrównolegle.

W tkance okrywowej roślin poddanej działaniu długich (sekundowych) i krótkich (milisekundowych) intensywnych impulsów światła generowane są sygnały napięcia elektrycznego [1,4]. Sygnały generowane przez impulsy światła stwierdzono również w skórze kręgowców i odpowiadają one znanemu w fizjologii zjawisku wczesnych potencjałów receptorowych (ERP). Zjawisko ERP, wykryte początkowo w fotoreceptorach oka, nie ma charakteru fotoelektrycznego, ponieważ struktury skóry i liści nie zawierają takiego fotoreceptora, jakim jest rodopsyna. Kształt sygnału ERP jest typowy dla impulsu piroelektrycznego i na taki charakter zjawiska wskazuje dodatkowo inwersja znaku sygnału, która występuje po odwróceniu próbki między elektrodami pomiarowymi.

LITERATURA

1. Arden G. B., Bridges C. D. B., Ikeda H., Siegel I. M., *Nature* 212 (1966), 1235.
2. Athenstaedt H., *Z. Pflanzenphysiol.* 68 (1972), 82.
3. Athenstaedt H., *Ann N.Y. Acad. Sci.* 238 (1974), 68.
4. Athenstaedt H., *Ferroelectrics* 11 (1976), 365.
5. Athenstaedt H., *Ferroelectrics* 14 (1976), 753.
6. Athenstaedt H., Claussen H., *Biophys. J.* 41 (1883), 359.
7. Bulanda W., *Zagadnienia Biofizyki Współczesnej* 11 (1986), 27.
8. Dereggi A. S., Derossi D. E., Roth S. C., Davis G. T., Broadhurst M. G., *Bull. Amer. Phys. Soc.* 27 (1982), 166.
9. Destruel P., Martine M., Bui Ai, Hong-The-Giam, *Bull. Amer. Phys. Soc.* 27 (1982), 295.
10. Fukada E., *Ultrasonics* 6 (1968), 229.
11. Fukada E., Date M., Hara K., *Jap. J. Appl. Phys.* 8 (1969), 151.
12. Kepler R. G., *Ann. Rev. Phys. Chem.* 29 (1978), 497.
13. Lang S. B., Steckel F., *Rev. Sci. Instr.* 36 (1965), 929.
14. Lang S. B., Athenstaedt H., *Science* 196 (1977), 985.
15. Lang S. B., Athenstaedt H., *Ferroelectrics* 17 (1978), 511.
16. Lang S. B., *Ferroelectrics* 47 (1983), 259.

17. Preston R. D., *Phys. Reports* 21C (1975), 183.
18. Scheinbeim J.I., Akgunduz C., Pae K. D., Newman B., *Bull. Amer. Phys. Soc.* 27 (1982), 295.
19. Shaulov A., Simhony M., *J. Appl. Phys.* 43 (1972), 1440.
20. Simhony M., Shaulov A., *J. Appl. Phys.* 42 (1971), 3741.
21. Simhony M., Shaulov A., *Appl. Phys. Lett.* 21 (1972), 375.
22. Simhony M., Athenstaedt H., *Biophys. J.* 29 (1980), 331.
23. Zimmerman R. L., *Biophys. J* 16 (1976), 1341.

SUMMARY

The article surveys the works on pyroelectricity of plant tissues. The experimental data indicating that pyroelectric properties of the tissues are due to their cellulose, polar lipid and some structural protein components are presented. The electric dipole moment of the structures is caused by a parallel alignment of molecular electric dipoles of the components. The experimental techniques (static method, radiant heating method) and theoretical background to calculate the pyroelectric coefficient are briefly referred. The pyroelectric coefficient values varied between $3,2 \text{ nC/m}^2\text{k} - 19 \text{ nC/m}^2\text{K}$. A pyroelectric response about 100 times higher than the normal one is obtained in the wheat and rye grains. The temperature and pressure changes as well as the imposition of dc electric field induce changes in pyroelectric responses of plant tissues. Subsequent investigations covering different plant tissues (phloem, xylem, epidermis of leaves, coating tissues of seeds) and revealing two directions of polarization: longitudinal polarization and outside - inside polarization are discussed. Evidences of the pyroelectric character of the measured voltages generated in tissues on heating and cooling are furnished. Results of the measurements carried out on the epidermis of the leaves of *Encephalartos villosus* (thermal time constant value, application of dc electric field, reduction in pressure during measurement) supporting the hypothesis that only a thin layer close external surface is pyroelectric are discussed. On the basis of described results on living tissues, the biological aspects of pyroelectric properties of plant tissues are analysed (pyroelectricity of winter and spring cereals, influence of electric fields on tissues, influence of pyroelectric measurements on germination, response of tissues on intense light flash).