

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I ELEKTRONIKI
KATEDRA ELEKTROTECHNIKI I ELEKTROENERGETYKI

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**ANALIZA TEORETYCZNA I EKSPERYMENTALNA WPŁYWU STAŁEGO I
ZMIENNEGO POLA MAGNETYCZNEGO NA KIELKOWANIE I WZROST
ZIARNIAKÓW WYBRANYCH ROŚLIN**

MGR INŻ. MIKOŁAJ SKOWRON

Promotor:

dr hab. inż. Antoni Cieśla, prof. AGH

Kraków, 2011

Wprowadzenie

Współczesny świat boryka się niedoborem żywności dobrej jakości. Ceny żywności gwałtownie rosną, a jej jakość spada. Spowodowane jest to stosowaniem środków chemicznych do procesów produkcji i przetwórstwa rolno – spożywczego. Środki te, mimo dużej skuteczności, stanowią zagrożenie dla środowiska. Wiele substancji aktywnych może przenikać do wnętrza nasion i modyfikować ich skład chemiczny a przede wszystkim zanieczyszczać środowisko.

Nowoczesna Inżynieria Rolnicza, szuka „bezpiecznych” metod podwyższania jakości plonów roślin uprawnych, wykorzystując interdyscyplinarne powiązanie nauk z zakresu biofizyki, biologii molekularnej i fizyki. Dobra jakość i odpowiednie przygotowanie materiału siewnego jest jednym z ważniejszych czynników plonotwórczych. Wykorzystanie niektórych czynników fizycznych stwarza nowe możliwości pobudzania materiału roślinnego do wzrostu. Metody przedsiewnej obróbki nasion stymulują przebieg zmian fizjologicznych i biochemicznych w nasionach, są zatem bezpieczne dla środowiska. Wśród tych metod można wymienić stymulowanie: promieniowaniem jonizującym, laserowym, podczerwonym, ultrafioletowym, ultradźwiękami, mikrofalami oraz polami elektrycznym, magnetycznym i elektromagnetycznym. Oddziaływanie polem magnetycznym na nasiona nie niesie zagrożenia dla środowiska a zwiększa efektywność procesów fizjologicznych, czego efektem jest większy wigor i wyższy poziom plonowania.

Cel i zakres pracy

Na podstawie przeprowadzonych badań i poczynionych obserwacji oraz studiów literaturowych, Autor formułuje następującą tezę swojej dysertacji:

Ze względu na zwiększenie zdolności kiełkowania, szybkości kiełkowania oraz skrócenie czasu kiełkowania, korzystna jest przedsiewna biostymulacja zmiennym oraz stałym w czasie polem magnetycznym ziaren i nasion wybranych roślin.

Autor, w trakcie realizacji swojej pracy stara się uzasadnić powyższą tezę, stawiając cele cząstkowe, m. in.:

- zapoznanie się ze stanem badań na świecie i w Polsce w zakresie wpływu oddziaływania pola magnetycznego na organizmy żywe, a w szczególności na rośliny,
- poznanie mechanizmów oddziaływania pola magnetycznego na organizmy żywe,
- zbadanie kształtu i struktury wewnętrznej wybranych do badań ziarniaków i nasion,
- analizę stężenia pierwiastków, mających kluczowe znaczenie w oddziaływaniach pola magnetycznego z badanymi nasionami i ziarniakami,
- przeprowadzenie analizy rozkładu żelaza i stopnia jego utlenienia w badanych materiałach,
- określenie właściwości magnetycznych badanych ziarniaków,
- wyznaczenie rozkładu pola magnetycznego w modelu stworzonym na podstawie przeprowadzonych badań i obserwacji,
- poddanie biostymulacji ziarniaków i nasion wybranych roślin oraz przeprowadzenie badań w zakresie określenia zdolności kiełkowania, a także wyznaczenia wskaźników: szybkości kiełkowania i średniego czasu kiełkowania w porównaniu z ziarniakami i nasionami nie stymulowanymi.

Przyjęte ograniczenia

Szeroki program badań wymagał przyjęcia stosownych uproszczeń dotyczących właściwości środowisk:

- ziarniaki są jednowarstwowymi sferoidami spłaszczonymi,
- środowisko otaczające (powietrze) jest izotropowe oraz liniowe,
- zmiany właściwości środowisk na granicach są skokowe.

Rozpatrywane zagadnienia

Niniejsza praca wnosi elementy nowości w rozpatrywane zagadnienia. W ocenie Autora elementami tymi są:

- badania nasion lnianki mikroskopem skaningowym,
- badania rozkładu żelaza, oraz jego stopnia utlenienia w ziarniakach pszenicy oraz nasionach lnianki metodą synchrotronową,
- badania właściwości magnetycznych ziarniaków pszenicy za pomocą magnetometru z wibrującą próbką,
- przedsięwzięta biostymulacja ziarniaków pszenicy silnym stałym polem magnetycznym,
- przedsięwzięta biostymulacja nasion lnianki zmiennym o częstotliwości 50 Hz i stałym polem magnetycznym nasion lnianki.

Struktura pracy

W rozdziale pierwszym opisano rezultaty studiów literaturowych oddziaływania pola magnetycznego na organizmy żywe, w szczególności na rośliny. Przedstawiono stan badań przeprowadzonych w Polsce i na świecie dotyczących przedsięwziętej biostymulacji ziaren oraz nasion. Przedstawiono mechanizmy oddziaływania pola magnetycznego na jony oraz pierwiastki magnetyczne występujące w organizmach żywych.

Rozdział drugi przedstawia badania elektronowym mikroskopem skaningowym JEOL (model 5400) ziarniaków pszenicy i nasion lnianki. Miały one na celu zaobserwowanie: kształtu i struktury badanych materiałów. Została przeprowadzona mikroanaliza składu pierwiastkowego na powierzchni badanych próbek. Następnie przedstawiono wyniki badań stężenia pierwiastków w ziarnaku pszenicy, wykonanych metodą analizy fluoroscencyjnej.

W kolejnym, trzecim rozdziale zawarto opis badań przedstawiających rozkład żelaza oraz określenie jego utlenienia za pomocą synchrotronowej metody spektroskopii absorpcji promieniowania X. Analiza została przeprowadzona dla ziarniaków pszenicy oraz nasion lnianki. Następnie zaprezentowano badania właściwości magnetycznych ziarniaków pszenicy. Do pomiarów użyto magnetometru wibracyjnego (Vibrating Sample Magnetometer – VSM – magnetometr z wibrującą próbką).

W rozdziale czwartym przedstawiony jest model matematyczny sferoidy spłaszczonej, stworzony na potrzeby analizy rozkładu natężenia pola magnetycznego wewnątrz i wokół paramagnetycznej sferoidy spłaszczonej, umieszczonej w polu magnetycznym. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch układów współrzędnych: układu kartezjańskiego oraz układu sferoidy spłaszczonej.

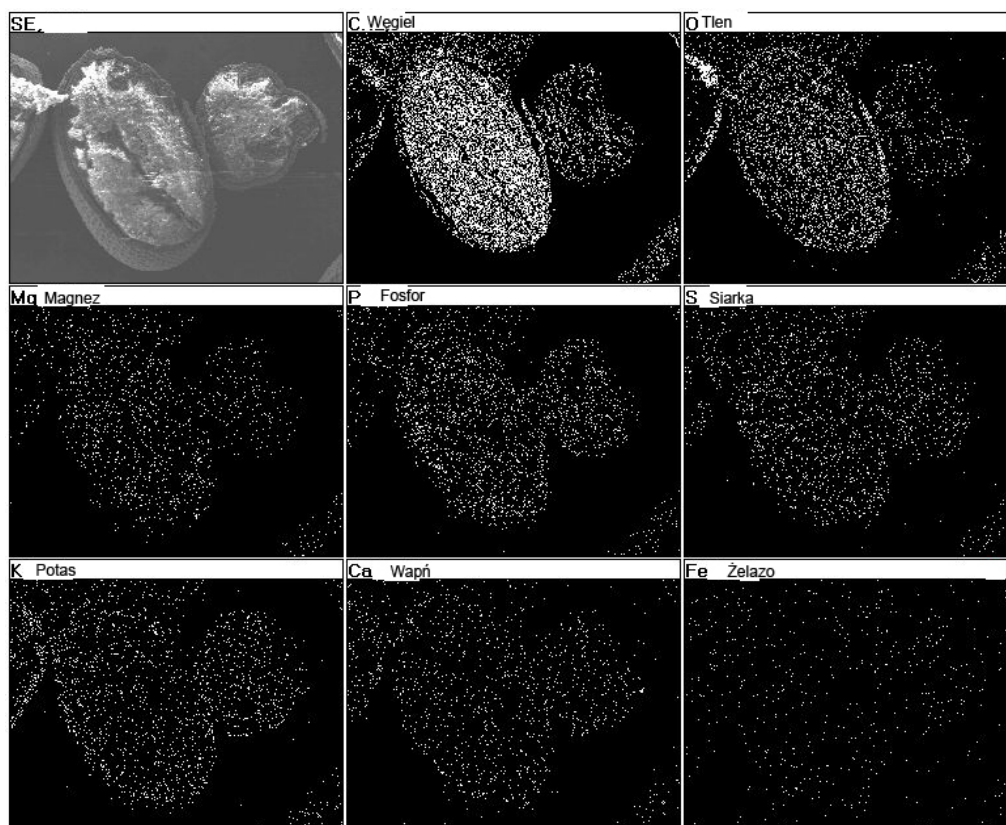
W piątym rozdziale przedstawiono urządzenia wzbudzające pole magnetyczne, użyte na potrzeby biostymulacji ziarniaków pszenicy i nasion lnianki. Opisana została cewka z uzwojeniem klasycznym, dwa elektromagnesy z uzwojeniem nadprzewodnikowym oraz magnesy trwałe.

Szósty rozdział przedstawia wyniki badań przedsięwziętej biostymulacji polem magnetycznym ziarniaków pszenicy i nasion lnianki. Oznaczone zostały wskaźniki: szybkości kiełkowania wg Maguire'a, średniego czasu kiełkowania wg Piepera, a także zdolność kiełkowania ziarniaków i nasion stymulowanych polem magnetycznym w porównaniu do próbek nie poddanych stymulacji.

W rozdziale siódmym Autor zestawił wnioski wynikające z poszczególnych badań i obserwacji.

Badania ziarniaka pszenicy i nasion lnianki mikroskopem skaningowym

Na rysunku 1 przedstawiono rozkład powierzchniowy udziału poszczególnych pierwiastków w badanym mikroobszarze nasion lnianki. Obrazy SEM przedstawiają rozkłady węgla, tlenu, magnezu, fosforu, siarki, potasu, wapnia i żelaza, które w badanych mikroobszarach cechuje równomierny udział, przy wyraźnie większym udziale zawartości węgla.



Rys. 1. Mapa rozkładu pierwiastków na powierzchni przekrojów nasion lnianki

Analizując otrzymane wyniki badania ziarniaków pszenicy i nasion lnianki mikroskopem skaningowym stwierdzono że:

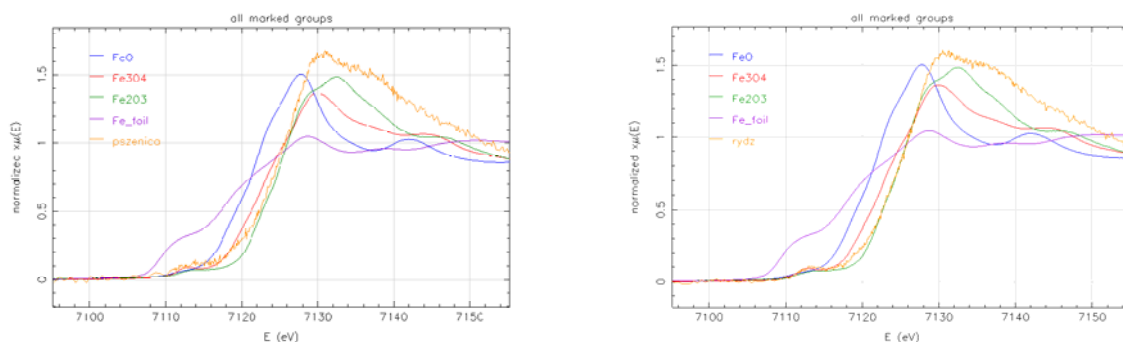
- kształt ziarniaka i nasiona jest zbliżony do elipsoidy lub sferoidy,
- badane obiekty mają strukturę warstwową o różnej grubości,
- rozkład badanych pierwiastków wewnątrz ziarniaka i nasion jest równomierny.

Powyższe wnioski pozwalają stwierdzić, że na potrzeby modelowania oddziaływania pola magnetycznego na ziarniaki pszenicy i nasiona lnianki, badane obiekty można przedstawić jako jednowarstwową sferoidę spłaszczoną, która ma właściwości paramagnetyczne.

Badanie stopnia utlenienia żelaza w ziarniakach pszenicy i nasionach lnianki

Widma z obszaru XANES można przeanalizować w oparciu o zestawienie widm wybranych próbek na jednym wykresie w celu porównania kształtu i położenia krawędzi absorpcji. Oprócz widm badanych próbek roślinnych na wykresy rys.2 naniesione zostały także widma próbek referencyjnych: folii metalicznej, magnetytu Fe_3O_4 , hematytu Fe_2O_3 i tlenku żelaza FeO w celu analizy stopnia utlenienia żelaza w badanych próbkach.

Przebiegi widm badanych próbek roślinnych są dosyć podobne. Nieco różne wysokości białej linii mogą być spowodowane niedokładnością normalizacji widm. Analizując położenie krawędzi absorpcji badanych próbek wyrażone przez wartości energii zmierzone w połowie wysokości skoku jednostkowego stwierdzić można, że żelazo zawarte w ziarniakach pszenicy i nasionach rydza znajduje się na +3 stopniu utlenienia, tak jak ma to miejsce w hemacie – Fe_2O_3 .



Rys.2. Widmo próbki pszenicy i próbki lnianki (rydza) wraz z widmami próbek referencyjnych

Badanie stężenia pierwiastków w ziarniaku pszenicy

Zbadano trzy próbki pszenicy w postaci trzech pojedynczych ziaren, przed pomiarem zostały one poddane mineralizacji. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 1.

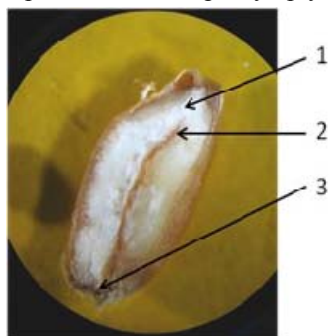
Tabela 1. Średnie stężenie pierwiastków w ziarniakach pszenicy

	Próba 1	Próba 2	Próba 3
Waga [mg]	29,0	32,7	38,7
Pierwiastek			
K [mg/kg]	4524,0	6660,7	3876,3
Ca [mg/kg]	481,3	339,7	266,3
Cr [mg/kg]	3,3	7,9	6,3
Mn [mg/kg]	31,1	51,1	26,9
Fe [mg/kg]	118,2	125,4	71,8
Ni [mg/kg]	4,4	9,5	2,2
Cu [mg/kg]	6,7	12,2	2,8
Zn [mg/kg]	24,7	30,0	27,2
Rb [mg/kg]	0,7	1,7	0,2
Sr [mg/kg]	2,0	2,2	1,3

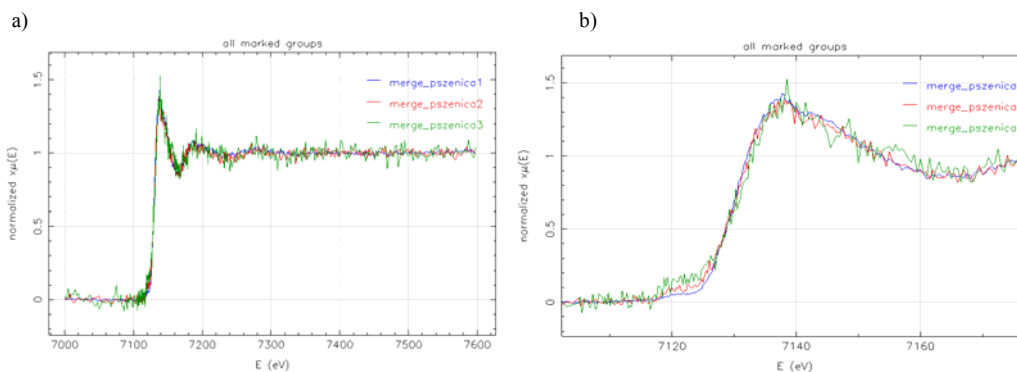
Spośród pierwiastków o właściwościach magnetycznych największą koncentrację na poziomie 71,8 – 125,4 mg/kg wykazuje żelazo. Drugim pierwiastkiem mającym właściwości magnetyczne jest mangan, którego koncentracja jest na poziomie 26,9 – 51,1 mg/kg.

Rozkład zawartości Fe w ziarniaku pszenicy

Badania w poszczególnych miejscach przekroju ziaren pszenicy (rys. 3) wykonane zostały z zastosowaniem mikrowiązki uzyskiwanej za pomocą mikrokapilary optycznej.



Rys. 3. Zdjęcie przekroju ziarna pszenicy; cyframi oznaczone zostały miejsca wykonywania pomiarów

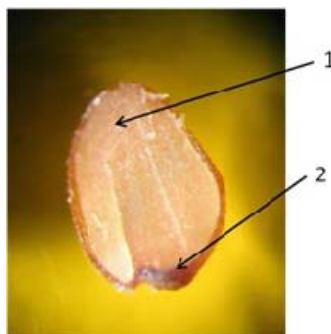


Rys. 4 a) znormalizowane widma absorpcyjne zmierzone na krawędzi K żelaza w trzech miejscach na przekroju ziarna pszenicy, b) obszar XANES widm absorpcyjnych zmierzonych na krawędzi K żelaza w trzech miejscach na przekroju ziarna pszenicy

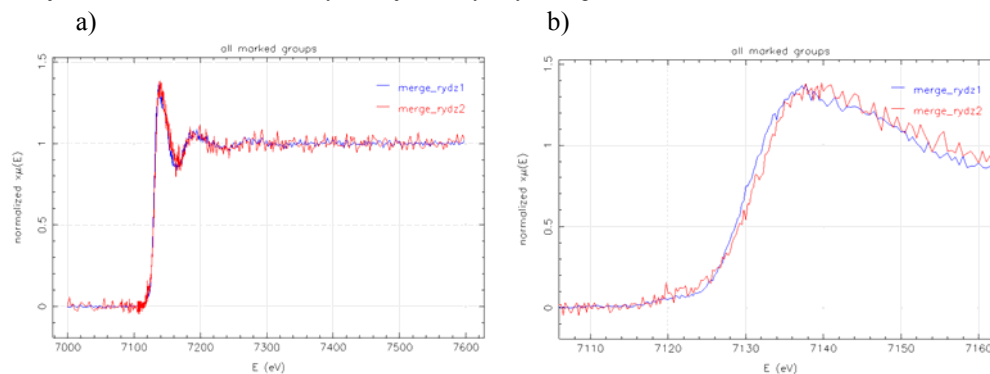
Znormalizowane widma z poszczególnych miejsc na ziarnie pszenicy pokrywają się, co oznacza, że żelazo znajdujące się w warstwie aleuronowej, jak i w okrywie owocowo-nasiennej, ma taki sam stopień utlenienia +3 (rys. 4). We wszystkich widmach występuje mały pik przedkrawędziowy, który jest największy w miejscu 3 – zarodku. Sugeruje on niewielkie różnice w lokalnej symetrii otoczenia żelaza. Większe szumy dla widm z miejsc 2 i 3 są związane ze znacznie niższą koncentracją żelaza niż w miejscu 1.

Rozkład zawartości Fe w nasionach lnianki (rydza)

Pomiary dla nasiona lnianki wykonane zostały tylko w dwóch miejscach (rys. 5), ponieważ jego wnętrze jest dosyć jednorodne w porównaniu z pszenicą.



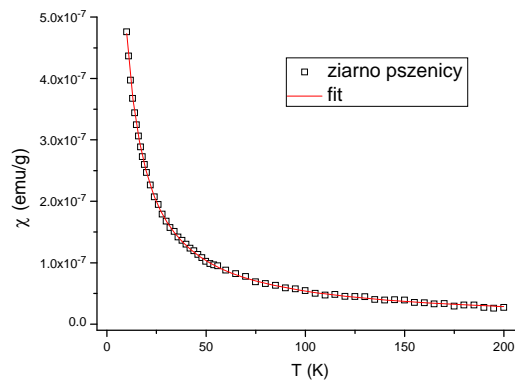
Rys. 5. Zdjęcie nasiona lnianki z oznaczonymi miejscami wykonywania pomiarów



Rys. 6. a) znormalizowane widma absorpcyjne zmierzone na krawędzi K żelaza w dwóch miejscach na przekroju nasiona rydza b) Obszar XANES widm absorpcyjnych zmierzonych na krawędzi K żelaza w dwóch miejscach na przekroju nasiona rydza

Widma znormalizowane (rys. 6), pokrywają się ze sobą zaraz przed krawędzią absorpcji i od pierwszej oscylacji za progiem aż do końca zakresu energii. Na samej krawędzi widma się nieznacznie rozsuwają – widmo z pomiaru przy warstwie owocowo-nasiennej, w połowie wysokości skoku na krawędzi jest przesunięte w stronę wyższych energii o około 1 eV. Zauważyć można także nieznaczne przesunięcie całej „białej linii”. Może to świadczyć o nieco innym otoczeniu atomowym (jonowym) żelaza w tych dwóch miejscach nasiona lnianki;

Badania właściwości magnetycznych ziarniaków pszenicy



Rys.7. Zależność namagnesowania paramagnetycznego ziarna pszenicy w polu 10 kOe od temperatury z dopasowaną krzywą teoretyczną

Zależność podatności magnetycznej (wartości M/H) ziarna pszenicy od temperatury uzyskana z pomiaru (po odjęciu zmierzonego wkładu od uchwytu próbki) przedstawiona jest na rysunku 7. Jest ona typu hiperbolicznego, co wskazuje na dominujący wkład typu paramagnetycznego. Dane eksperymentalne zostały dopasowane hiperbolą typu $y = a/x + b$ w zakresie temperatur 10 – 200 K. Taki wybór zakresu dopasowania wynikał stąd, że w wyższych temperaturach jest duży udział "szumów" i artefaktów pomiarowych (widocznych na rysunku 7 jako odchylenia od przebiegu hiperbolicznego) w porównaniu z sygnałem od podatności paramagnetycznej próbki.

Pomiary krzywych magnesowania i zależności temperaturowej podatności stałoprądowej przeprowadzone dla pojedynczego ziarniaka pszenicy pokazują, że oprócz wkładu diamagnetycznego niezależnego od temperatury, wykazuje on mierzalny paramagnetyzm. Zależność temperaturowa wkładu paramagnetycznego dopasowana została zależnością hiperboliczną reprezentującą prawo Curie.

Otrzymana wartość momentu efektywnego odpowiada w przybliżeniu połowie spodziewanej dla zawartości żelaza wyznaczonej z analizy fluorescencyjnej przy założeniu wysokospinowego stanu Fe^{3+} . Może to być spowodowane obecnością niskospinowego Fe, lub antyrównoległym sprzężeniem części momentów żelaza w klastrach żelazowo-siarkowych w ferredoksynach, które zawierają 80% całkowitej ilości Fe w ziarniakach. Za tym drugim przemawia obecność słabych korelacji antyferromagnetycznych wywnioskowana z ujemnej wartości paramagnetycznej temperatury Curie θ .

Opis matematyczny sferoidy spłaszczonej

Obliczenia rozkładu natężenia pola magnetycznego przeprowadzono dla dwóch układów współrzędnych: układu sferoidy spłaszczonej oraz układu współrzędnych kartezjańskich. Użycie układu sferoidy spłaszczonej wynika z kształtu ziarniaków oraz z dobrze zachowanej symetrii osiowej ziarniaków. Układ współrzędnych kartezjańskich użyto w celu zobrazowania obliczeń rozkładu pola magnetycznego w najbardziej popularnym układzie współrzędnych.

W układzie współrzędnych sferoidy spłaszczonej równanie Laplace'a ma postać:

$$\nabla^2 V_m = \frac{1}{a^2(\cosh^2\eta - \sin^2\theta)} \left(\frac{\partial^2 V_m}{\partial \eta^2} + \operatorname{tgh}\eta \frac{\partial V_m}{\partial \eta} + \frac{\partial^2 V_m}{\partial \theta^2} + \operatorname{ctg}\theta \frac{\partial V_m}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{a^2 \cosh^2\eta \sin^2\theta} \frac{\partial^2 V_m}{\partial \psi^2} = 0$$

Potencjał jest funkcją jednej zmiennej η , rozwiązanie równania Laplace'a dla takiego przypadku ma postać:

$$V_m = A + B \operatorname{arctg}(\sinh\eta)$$

lub

$$V_m = C + D \operatorname{arctg}(\sinh\eta)$$

w których

A, B, C, D – stałe całkowania.

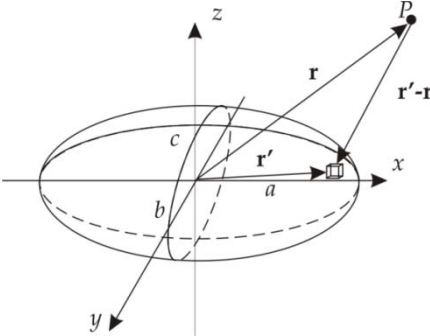
Natężenie pola magnetycznego wokół namagnesowanej sferoidy można obliczyć z zależności:

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{a}_\eta}{a\sqrt{\cosh^2\eta - \sin^2\theta}} \frac{V_{m0}}{\text{arctg}(\sinh\eta_0)} \frac{1}{\cosh\eta}$$

Natężenie pola magnetycznego wewnątrz sferoidy umieszczonej w jednorodnym polu magnetycznym:

$$\mathbf{H} = H_0 \mathbf{a}_\eta \left[1 + \frac{\sinh\eta_0 \text{arctg}(\sinh\eta_0) - \text{tgh}^2\eta_0}{1 - \sinh\eta_0 \text{arctg}(\sinh\eta_0)} \right]$$

Rozpatrując w układzie współrzędnych kartezjańskich sferoidę spłaszczoną z półosiami a, b, c która jest jednorodnie namagnesowana gęstością magnetycznego ładunku ρ_m (rys. 8), potencjał w dowolnym punkcie P można wyznaczyć przy pomocy wzoru:

$$V_m(\mathbf{r}) = \frac{K\rho_m}{4\pi} \iiint \frac{dx' dy' dz'}{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|}$$


Rys. 8. Jednorodnie namagnesowana sferoida spłaszczona w układzie współrzędnych (x, y, z)

Potencjał magnetyczny pochodzący od jednorodnie namagnesowanej sferoidy wzdłuż krótszej osi wyznacza się z zależności:

$$V'_m(\mathbf{r}) = -M_z \frac{ca^2}{f^2} \xi (\zeta \text{ctg}^{-1}\zeta - 1)$$

Poszczególne składowe natężenia pola mają postać:

$$\left. \begin{aligned} \frac{H_x(\mathbf{r})}{M_z a^2 c f^{-3}} &= \frac{\xi(1-\xi)^{\frac{1}{2}}}{(\zeta^2 - \xi^2)(1-\zeta)^{\frac{1}{2}}} \cos\theta \\ \frac{H_y(\mathbf{r})}{M_z a^2 c f^{-3}} &= \frac{\xi(1-\xi)^{\frac{1}{2}}}{(\zeta^2 - \xi^2)(1-\zeta)^{\frac{1}{2}}} \sin\theta \\ \frac{H_z(\mathbf{r})}{M_z a^2 c f^{-3}} &= \text{ctg}^{-1}\zeta - \frac{\zeta}{\zeta^2 + \xi^2} \end{aligned} \right\}$$

Sferoida spłaszczona, jednorodnie namagnesowana wzdłuż dłuższej osi

Dla aktualnie rozpatrywanego przypadku zależność opisująca potencjał przybiera postać:

$$V'_m(\mathbf{r}) = -\frac{M_x ca^2}{2 f^2} (1 - \xi^2)^{\frac{1}{2}} (1 + \zeta^2)^{\frac{1}{2}} \left(\text{ctg}^{-1}\zeta - \frac{\zeta}{1 + \xi^2} \right) \cos\theta$$

Poszczególne składowe natężenia pola mają postać:

$$\left. \begin{aligned} \frac{H_x(\mathbf{r})}{M_x a^2 c f^{-3}} &= -\left\{ \frac{1}{2} \left(\text{ctg}^{-1}\zeta - \frac{\zeta}{1 + \xi^2} \right) + \frac{\zeta(1 - \xi^2)}{(\zeta^2 + \xi^2)(1 + \zeta^2)} \cos^2\theta \right\} \\ \frac{H_y(\mathbf{r})}{M_x a^2 c f^{-3}} &= \frac{\zeta(1 - \xi^2)}{(\zeta^2 + \xi^2)(1 + \zeta^2)} \cos\theta \sin\theta \\ \frac{H_z(\mathbf{r})}{M_x a^2 c f^{-3}} &= \frac{\xi(1 - \xi^2)^{\frac{1}{2}}}{(\zeta^2 + \xi^2)(1 + \zeta^2)^{\frac{1}{2}}} \cos\theta \end{aligned} \right\}$$

Pole magnetyczne w sferoidzie, umieszczonej w jednorodnym polu, będzie również jednorodne i równoległe do pola zewnętrznego niezależnie od orientacji osi

$$V'_m(\mathbf{r}) = -\frac{H_{0x}x}{1 + \frac{abc}{2\mu_2}(\mu_1 - \mu_2)A_1} - \frac{H_{0y}y}{1 + \frac{abc}{2\mu_2}(\mu_1 - \mu_2)A_2} - \frac{H_{0z}z}{1 + \frac{abc}{2\mu_2}(\mu_1 - \mu_2)A_3}$$

gdzie:

$$A_1 = \int_0^\infty \frac{ds}{(s+a^2)R_s} \quad A_2 = \int_0^\infty \frac{ds}{(s+b^2)R_s} \quad A_3 = \int_0^\infty \frac{ds}{(s+c^2)R_s}$$

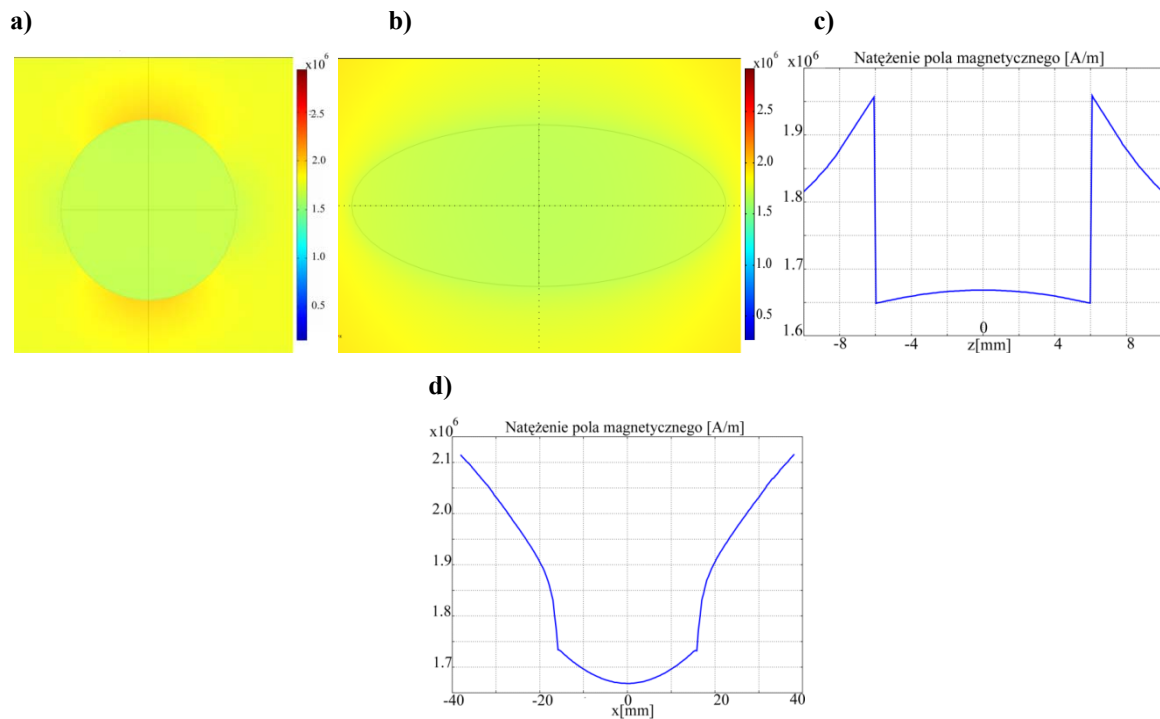
$$R_s = [(s+a^2)(s+b^2)(s+c^2)]^{\frac{1}{2}} \quad s = x, y, z$$

μ_1, μ_2 – przenikalność magnetyczna odpowiednio na zewnątrz, wewnątrz sferoidy.

Poszczególne składowe natężenia pola mają postać:

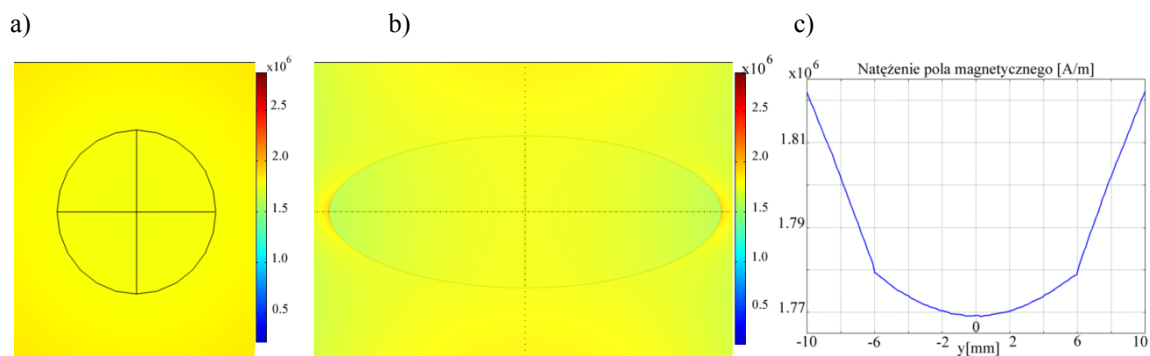
$$\left. \begin{aligned} H_x(r) &= \frac{H_{0x}}{1 + \frac{abc}{2\mu_2}(\mu_1 - \mu_2)A_1} \\ H_y(r) &= \frac{H_{0y}}{1 + \frac{abc}{2\mu_2}(\mu_1 - \mu_2)A_2} \\ H_z(r) &= \frac{H_{0z}}{1 + \frac{abc}{2\mu_2}(\mu_1 - \mu_2)A_3} \end{aligned} \right\}$$

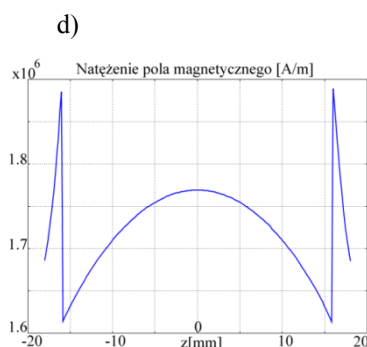
Sferoida spłaszczona umieszczona w jednorodnym polu magnetycznym spolaryzowanym wzdłuż krótszej osi sferoidy



Rys. 9. Rozkłady natężenia pola magnetycznego dla: a) płaszczyzny $z = 0$, b) płaszczyzny $x = 0$.
Wykresy natężenia pola magnetycznego dla: c) $x = 0, y = 0$ oraz $-10 < z < 10$, d) $y = 0, z = 0$ oraz $-33 < x < 33$

Sferoida spłaszczona umieszczona w jednorodnym polu magnetycznym spolaryzowanym wzdłuż dłuższej osi sferoidy





Rys. 10. Rozkłady natężenia pola magnetycznego dla: a) płaszczyzny $z = 0$, b) płaszczyzny $y = 0$.
Wykresy natężenia pola magnetycznego dla: c) $x = 0, z = 0$ oraz $-10 < y < 10$, d) $x = 0, y = 0$ oraz $-18 < z < 18$

Sferoida spłaszczona o właściwościach paramagnetycznych, umieszczona w jednorodnym polu, powoduje zniekształcenie tego pola. Rozpatrując przypadek pola magnetycznego spolaryzowanego wzdłuż jednej z krótszych osi można zauważyć, że największe zniekształcenia są na granicy ośrodków gdzie linie pola wnikają w sferoidę pod większym kątem. Dla płaszczyzny $z = 0$ pole magnetyczne wewnątrz sferoidy nieznacznie rośnie zbliżając się do jej środka, względem krawędzi sferoidy. Natomiast dla powierzchni $x = 0$ natężenie pola nieznacznie maleje zbliżając się do środka sferoidy względem jej krawędzi.

Analizując drugi przypadek, w którym pole magnetyczne jest spolaryzowane wzdłuż dłuższej osi sferoidy, można zaobserwować, że zniekształcenia pola magnetycznego są największe na granicy ośrodków gdzie linie pola wnikają do wnętrza sferoidy pod większym kątem. Dla płaszczyzny $z = 0$, natężenie pola magnetycznego, zbliżając się do środka sferoidy nieznacznie maleje w stosunku do krawędzi sferoidy. Dla płaszczyzny $y = 0$ jest przeciwnie tzn. bliżej środka sferoidy pole rośnie względem krawędzi. Na zewnątrz sferoidy przy największej krzywiznie powstaje szybki wzrost pola, który następnie maleje do wartości pola zewnętrznego.

Wewnątrz namagnesowanej sferoidy spłaszczonej natężenie pola magnetycznego ma stałą wartość w całej przestrzeni. Na zewnątrz sferoidy na granicy ośrodków, natężenie pola nieznacznie rośnie i następnie szybko maleje. Wzrost natężenia jest tym większy im większa jest krzywizna sferoidy. Zniekształcenie pola jest większe dla sferoidy namagnesowanej wzdłuż dłuższej osi.

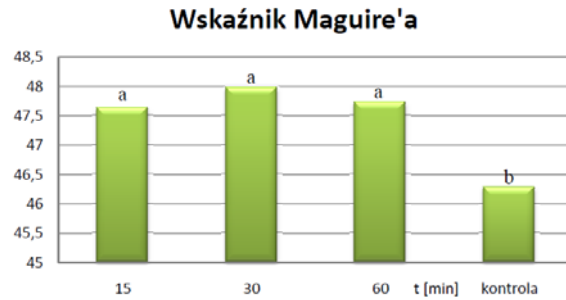
Badania eksperymentalne

Do doświadczeń użyto ziarniaków pszenicy ozimej odmiany „Symfonia” i nasion Inianki ozimej odmiany „Przybrodzka”. Na potrzeby biostymulacji zmiennym polem magnetycznym wybrano trzy wartości indukcji pola magnetycznego: 40 [mT], 70 [mT] i 100 [mT]. Dla każdej wartości przyporządkowano trzy czasy ekspozycji: 15 [min], 30 [min], 60 [min]. Do biostymulacji stałym w czasie polem magnetycznym wybrano wartości indukcji: 1 [T], 2 [T], 3 [T], 4 [T], 5 [T], 6 [T]. Dla każdej z tych wartości przyporządkowano trzy czasy ekspozycji 1 [min], 5 [min], 10 [min].

Dla ziarniaków i nasion poddanych stymulacji zmiennym i stałym w czasie polem magnetycznym o zróżnicowanej indukcji pola magnetycznego i czasie ekspozycji, oznaczono zdolność kiełkowania zgodnie z przepisami International Seed Testing Association ISTA (1999) oraz Normą PN – 79/R–65950.

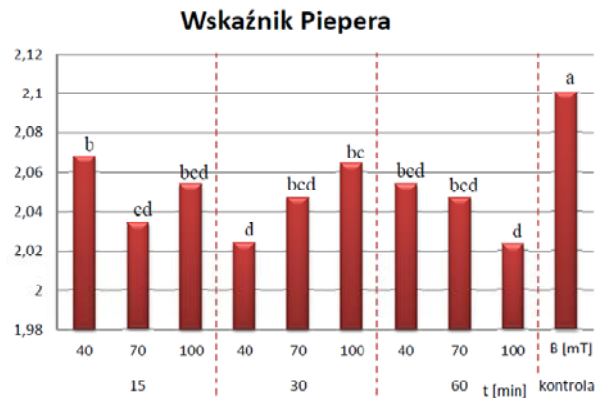
Dla otrzymanych wyników zdolności kiełkowania, średniego czasu kiełkowania wg Piepera oraz szybkości kiełkowania wg Maguiere’a obliczono dwuczynnikowe analizy wariancji. Pierwszym czynnikiem była wartość pola magnetycznego użytego do biostymulacji, a drugim czas ekspozycji nasion. Istotność badanych źródeł zmienności testowano testem F Snedecora. Istotność zróżnicowania średnich przedstawiono z zastosowaniem wielokrotnego testu Duncana. Wyniki testu Duncana zaprezentowano za pomocą liter (a – h) na wykresach. Różne litery wskazują na istotne różnice wpływu poszczególnych czynników.

Szybkość kiełkowania oznaczona za pomocą współczynnika Maguire’a dla ziarniaków pszenicy stymulowanych polem magnetycznym zawierała się w przedziale od 45,5 do 50,0 (rys. 11). Czas ekspozycji istotnie wpłynął na wzrost szybkości kiełkowania średnio o 3,5% w porównaniu z szybkością kiełkowania ziarniaków kontroli.



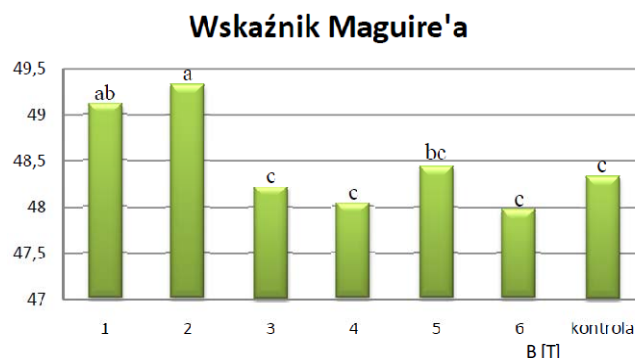
Rys. 11. Wpływ czasu ekspozycji na wskaźnik szybkości kiełkowania wg Maguire'a ziarniaków pszenicy stymulowanych zmiennym polem magnetycznym
– wartości średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie

Wykazano również istotne współdziałanie badanych czynników. Najkrótszy średni czas kiełkowania obserwowano po biostymulacji polem magnetycznym o wartości indukcji 40 [mT] i 100 [mT] i czasie ekspozycji 30 [min] i 60 [min] (rys. 12). Nasiona kontroli charakteryzowały się istotnie dłuższym średnim czasem kiełkowania.



Rys. 12. Wpływ pola magnetycznego i czasu ekspozycji na wskaźnik średniego czasu kiełkowania wg Piepera, nasion Inianki stymulowanych zmiennym polem magnetycznym
– wartości średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie

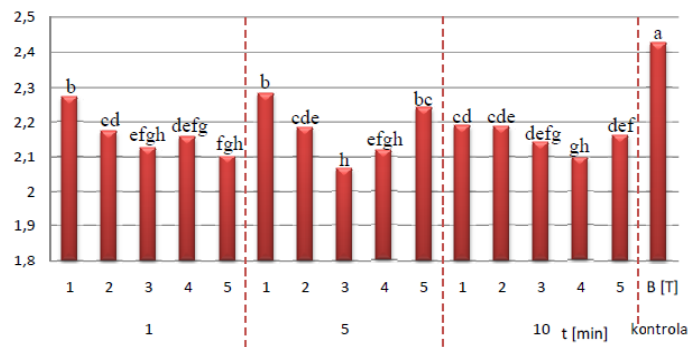
Stwierdzono istotny wpływ pola magnetycznego o wartości indukcji 1 [T] i 2[T] na szybkość kiełkowania oznaczonej za pomocą współczynnika Maguire'a (rys 13), dla tych pól szybkość kiełkowania zwiększyła się średnio o 2%



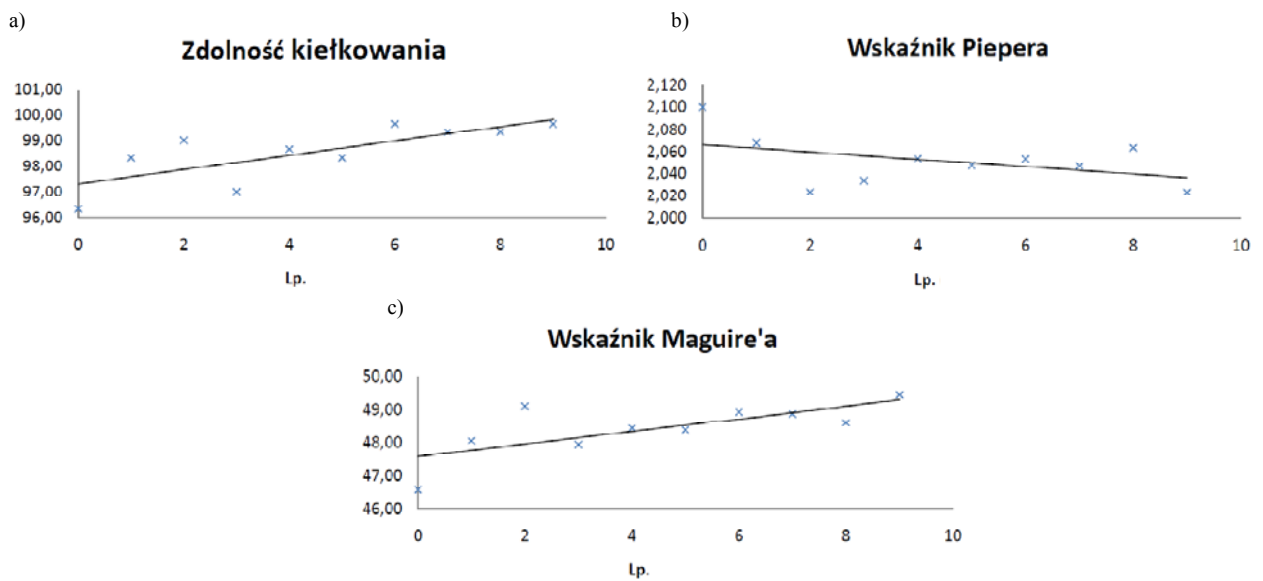
Rys. 13. Wpływ wartości indukcji pola magnetycznego na wskaźnik szybkości kiełkowania wg Maguire'a ziarniaków pszenicy
– wartości średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie

Wykazano również istotne współdziałanie badanych czynników (rys. 14). Najkrótszy średni czas kiełkowania obserwowano po biostymulacji polem magnetycznym o wartości indukcji 3 [T] i czasie ekspozycji 5 [min].

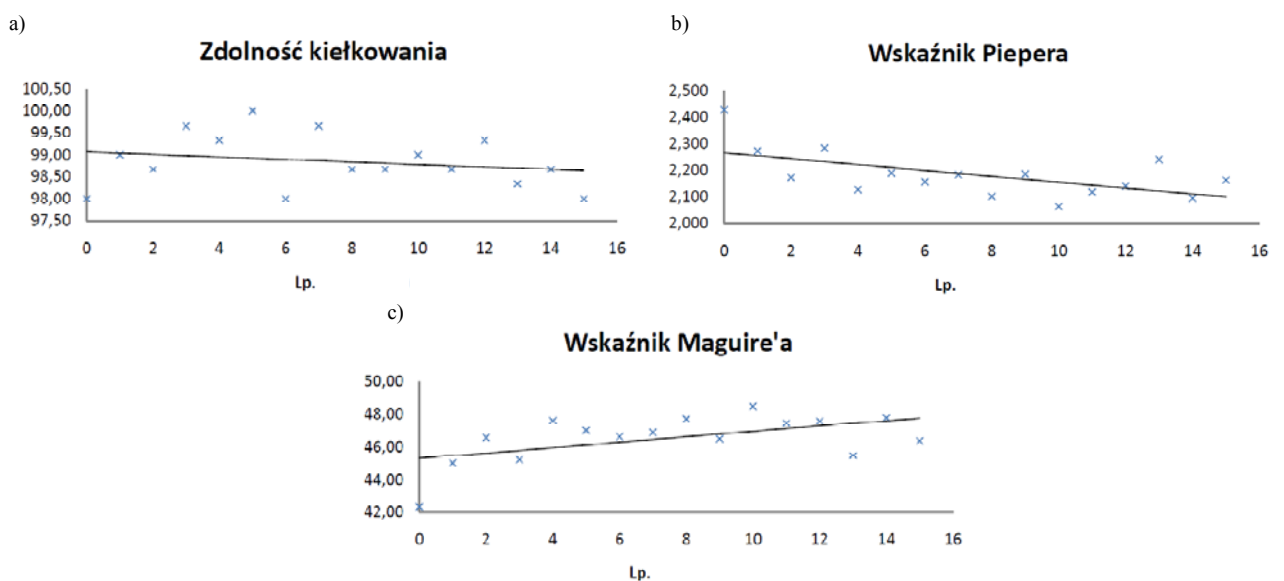
Wskaźnik Piepera



Rys. 6.14. Wpływ wartości indukcji pola magnetycznego i czasu ekspozycji na wskaźnik średniego czasu kiełkowania wg Piepera nasion lniarki stymulowanych stałym polem magnetycznym – wartości średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie



Rys. 15. Wskaźniki kiełkowania nasion lniarki stymulowanych zmiennym polem magnetycznym a) zdolność kiełkowania, b) wskaźnik Piepera, c) wskaźnik Maguire'a



Rys. 16. Wskaźniki kiełkowania nasion lniarki stymulowanych stałym w czasie polem magnetycznym a) zdolność kiełkowania, b) wskaźnik Piepera, c) wskaźnik Maguire'a

Wykresy (rys. 15 i 16) przedstawiają średnie wartości wskaźników kiełkowania nasion lnianki dla danej dawki ekspozycyjnej oraz trendy liniowe obliczone na ich podstawie.

Dla nasion stymulowanych zmiennym polem magnetycznym można zauważyć trend rosnący dla wykresów zdolności kiełkowania i szybkości kiełkowania (wskaźnik Maguire'a), natomiast malejący trend dla czasu kiełkowania (wskaźnik Piepera). Oznacza to zwiększenie zdolności i szybkości kiełkowania oraz skrócenie czasu kiełkowania wraz ze wzrostem dawki ekspozycyjnej, a więc pozytywny wpływ biostymulacji zmiennym polem magnetycznym.

Dla nasion lnianki wykres zdolności kiełkowania ma malejący trend. Oznacza to mniejszą zdolność kiełkowania nasion poddanych stymulacji większą dawką ekspozycyjną. Jednak większość wyników zdolności kiełkowania ma większe wartości niż kontrola. Trend na wykresie szybkości kiełkowania jest rosnący, a na wykresie czasu kiełkowania jest malejący, oznacza to zwiększenie szybkości kiełkowania oraz skrócenie czasu kiełkowania wraz ze wzrostem dawki ekspozycyjnej.

Na podstawie uzyskanych wyników biostymulacji ziarniaków pszenicy i nasion lnianki polem magnetycznym, wykazano istotny wpływ tego zabiegu na poprawę zdolności kiełkowania oraz wskaźników średniego czasu kiełkowania i szybkości kiełkowania.

Bardziej podatne na stymulację okazały się nasiona lnianki u których wartość indukcji pola magnetycznego i czas ekspozycji istotnie wpłynęły na poprawę wskaźników kiełkowania.

Przyjęte do oceny wskaźniki kiełkowania okazały się bardzo przydatne, pokazały wpływ pola magnetycznego na kiełkowanie ziarniaków i nasion. Autor użył nasion które miały wysoką zdolność kiełkowania, uniemożliwiło to obserwację wyższego wpływu biostymulacji polem magnetycznym.

Wnioski i podsumowanie

Zgodnie ze sformułowaną we Wprowadzeniu tezę dysertacji i postawionymi celami Autor, aby dowieść jej słuszności zrealizował następujące zadania:

- przeprowadził szczegółowe studia literaturowe nad oddziaływaniem pola magnetycznego na organizmy żywe w szczególności na rośliny, oraz przedstawił możliwe mechanizmy oddziaływania pola magnetycznego na żywe organizmy,
- przeprowadził badania mikroskopem skaningowym mające na celu zaobserwowanie kształtu oraz struktury wewnętrznej badanych materiałów,
- wykonał analizę stężenia pierwiastkowego w badanych ziarniakach,
- przeprowadził analizę rozkładu żelaza oraz określił stopień jego utlenienia,
- zbadał właściwości magnetyczne badanych ziarniaków,
- wykonał analizę rozkładu pola magnetycznego pojedynczego ziarniaka umieszczonego w polu magnetycznym,
- przeprowadził badania przedsięwziętej biostymulacji ziarniaków pszenicy i nasion lnianki polem magnetycznym,

Przedstawione w rozdziale 2 badania mikroskopem skaningowym ziarniaków pszenicy i nasion lnianki pozwalają na określenie kształtu badanych materiałów. Można je opisać jako sferoidy spłaszczone.

Określenie stopnia utlenienia żelaza wchodzącego w skład badanych próbek oraz analiza rozkładu żelaza w ziarniakach pozwala na przedstawienie, na potrzeby analizy wpływu pola magnetycznego, jako jednowarstwowej sferoidy spłaszczonej. Żelazo występuje głównie na +3 stopniu utlenienia i najczęściej znajduje się go wewnątrz ziaren, w warstwie endospermy, a najmniej – w okrywie owocowo-nasiennej.

Przeprowadzone badania właściwości magnetycznych ziarniaków, pokazują dominujący w nich wkład, niezależny od temperatury, typu diamagnetycznego ze znacznym udziałem wkładu paramagnetycznego z zależnością temperaturą opisywaną prawem Curie. Większość żelaza jest zawarta w ferredoksynach i jest w stanie wysokospinowym, a część jego momentów magnetycznych wykazuje sprzężenie antyrównoległe z momentami sąsiednich atomów Fe. Można więc przypuszczać, że zewnętrzne pole magnetyczne oprócz efektu magnetostrykcyjnego może powodować zmiany lokalnego sprzężenia momentów Fe, a zatem możliwość wpływania na efektywność transferu elektronowego, lub innych procesów kluczowych dla energetyki rozwoju zarodków.

W oparciu o przeprowadzone rozważania na potrzeby analizy rozkładu natężenia pola magnetycznego wewnątrz i wokół ziarniaków, można je modelować jako jednowarstwowe sferoidy spłaszczone o

właściwościach paramagnetycznych. Dla uproszczenia obliczeń przyjęto następujące założenia co do właściwości środowisk:

- sferoida oraz środowisko otaczające (powietrze) jest izotropowe oraz liniowe,
- zmiany właściwości środowisk na granicach są skokowe.

Przeprowadzona symulacja komputerowa obrazuje rozkład natężenia pola magnetycznego wewnątrz, a także wokół sferoidy spłaszczonej, posiadającej właściwości paramagnetyczne, umieszczonej w jednorodnym polu magnetycznym.

Obiecujące wyniki rozważań teoretycznych, potwierdzone badaniami kształtu oraz właściwości magnetycznych, a także modelem komputerowym, zachęciły Autora do przeprowadzenia eksperymentu na rzeczywistych obiektach. Do badań przedsięwziętej biostymulacji polem magnetycznym wybrane zostały ziarniaki pszenicy oraz nasiona lnianki. Badania eksperymentalne składały się z trzech etapów: wstępnego – miał on na celu ilościowe potwierdzenie wpływu pola magnetycznego na kiełkowanie roślin, wyniki okazały się bardzo obiecujące (rozdział 6.2). Etap drugi polegał na biostymulacji ziarniaków pszenicy i nasion lnianki zmiennym polem magnetycznym o częstotliwości 50 Hz (rozdział 6.3). W etapie trzecim materiał siewny poddany został działaniu stałego w czasie pola magnetycznego (rozdział 6.4).

Ziarniaki i nasiona zostały wysiane zgodnie z normami, określone zostały współczynniki, opisujące jakość materiału siewnego, takie jak: zdolność kiełkowania, współczynnik szybkości kiełkowania wg Maguire'a oraz współczynnik średniego czasu kiełkowania jednego ziarniaka wg Piepera. Wykonana analiza statystyczna przeprowadzona na wynikach otrzymanych z eksperymentów, dowiodła istotnego wpływu przedsięwziętej biostymulacji zarówno zmiennym jak i stałym w czasie polem magnetycznym na ziarniaki pszenicy oraz nasiona lnianki. Wpływ ten był zróżnicowany dla różnych czasów ekspozycji i wartości indukcji pola magnetycznego. Bardziej podatne na biostymulację okazały się nasiona lnianki u których ten zabieg istotnie wpłynął na poprawę wskaźników kiełkowania.

Wskaźniki oceny średniego czasu kiełkowania i szybkości kiełkowania okazały się bardziej czułe w porównaniu do oceny zdolności kiełkowania. Wysoka zdolność kiełkowania ograniczyła możliwości obserwacji wyższego efektu biostymulacji.

Za własne osiągnięcia przy realizacji programu badawczego Autor uważa:

- badania ziarniaków pszenicy i nasion lnianki mikroskopem skaningowym,
- badania rozkładu żelaza, oraz jego stopnia utlenienia w ziarniakach pszenicy oraz nasionach lnianki,
- badania właściwości magnetycznych ziarniaków pszenicy za pomocą magnetometru z wirującą próbką,
- przeprowadzenie przedsięwziętej biostymulacji ziarniaków pszenicy silnym stałym polem magnetycznym,
- przeprowadzenie przedsięwziętej biostymulacji nasion lnianki zmiennym o częstotliwości 50 Hz i stałym polem magnetycznym,

Teza pracy odnosi się do **wplywu zmiennego oraz stalego w czasie pola magnetycznego na wzrost zdolności kiełkowania, szybkości kiełkowania oraz skrócenie czasu kiełkowania stymulowanych ziarniaków i nasion roślin.**

Według Autora, teza pracy została w niniejszej rozprawie pozytywnie zweryfikowana, a założone cele zostały osiągnięte. Świadczą o tym rezultaty przeprowadzonych badań zarówno teoretycznych jak i – przede wszystkim – eksperymentalnych.

Najważniejsze prace doktoranta

1. Cieśla A., Kraszewski W., **Skowron M.**: „Wybrane zagadnienia związane z zastosowaniem nadprzewodników wysokotemperaturowych w elektroenergetyce” Przegląd Elektrotechniczny ISSN 1731-6103 EUI 2005 Krynica, 27–30 września 2005, s.49–52
2. Cieśla A., Kraszewski W., **Skowron M.**, Strzałka K.: „Wykorzystanie materiałów nadprzewodzących w elektroenergetyce” Biuletyn Techniczny Oddziału Krakowskiego Stowarzyszenia Elektryków Polskich; ISSN 1426-742X – 2006, nr 33 s.16-25
3. Cieśla A., Kraszewski W., **Skowron M.**, Syrek P.: „Wykorzystanie silnego pola magnetycznego wzbudzonego przez elektromagnes nadprzewodnikowy do biostymulacji przedśiewnej nasion” AGROLASER 2006 Lublin 5–7. 09. 2006, PTA 2006, s.26-33
4. Cieśla A., Kraszewski W., **Skowron M.**: „Możliwości zastosowania nadprzewodnictwa” Pomiar Automatyka Kontrola nr 3, 2007, s.95-101
5. Cieśla A., **Skowron M.**: „The analysis of the static magnetic field in paramagnetic spheroids at the laminar structure on the example grain wheat” ISEF'2007 ISBN: 978-80-01-03784-3 September 13–15, 2007, Prague s.1-6
6. Cieśla A., **Skowron M.**: „Biostymulacja ziarniaków silnym stałym polem magnetycznym” Prace Instytutu Elektrotechniki Vol. 55, No. 236, 2008, s.143-167
7. Cieśla A., **Skowron M.**: „Many layer paramagnetic oblate spheroid in the homogeneous magnetostatics field on the example grain wheat” IEEE CEFC 2008: 13th biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation Athens, 11–15 May 2008
8. Cieśla A., **Skowron M.**: „The analysis of the static magnetic field in co-ordinate oblate spheroids on example wheat grain” IC – SPETO 2008 Gliwice – Ustron 28–31.05.2008, s.35-36
9. Cieśla A., Kraszewski W., **Skowron M.**: „Zastosowanie elektromagnesu nadprzewodnikowego do biostymulacji przedśiewnej nasionsilnym polem magnetycznym” Zastosowania nadprzewodników ZN-8 ISBN 978-83-61301-15-8 Lublin, 2008, s.72–79
10. Cieśla A., **Skowron M.**: „The use the strong magnetic field to biostimulation pre-sowing seed” PIERS 2009 ISSN 1559-9450 August 18–21, Moscow 2009, Russia s.845–846
11. Cieśla A., **Skowron M.**: „Obliczanie pola magnetycznego dla sferoidy spłaszczonej w układzie współrzędnych prostokątnych” Prace Instytutu Elektrotechniki Vol. 57, No. 248, 2010, s.33–50
12. **Skowron M.**: „Rozkład statycznego pola magnetycznego wokół oraz wewnątrz wielowarstwowego elementu paramagnetycznego z wykorzystaniem współrzędnych sferoidy spłaszczonej” OWD'2007, IX Międzynarodowe Warsztaty Doktoranckie Vol. 23, s.253-258
13. **Skowron M.**: „Biostymulacja nasion lnianki silnym stałym polem magnetycznym” WD 2009 Warsztaty doktoranckie: Krynica Zdrój 5–8 września 2009.
14. **Skowron M.**: „Biostymulacja nasion lnianki silnym stałym polem magnetycznym” Prace Instytutu Elektrotechniki Vol. 56, No. 243, 2009, s.149-170
15. **Skowron M.**: „Obliczanie pola magnetycznego dla sferoidy spłaszczonej w układzie współrzędnych prostokątnych” Warsztaty Doktoranckie : Lublin, 24–27 czerwca 2010