

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA

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

ROZPRAWA DOKTORSKA

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

MGR INŻ. MIKOŁAJ SKOWRON

Promotor:
dr hab. inż. Antoni Cieśla, prof. AGH

Kraków, 2011

*Umiejętności dopotąd są jeszcze próżnym wynalazkiem, może
czczym tylko rozumem wywodem, albo próżniactwa zabawą,
dopokąd nie są zastosowane do użytku narodów. I uczeni potąd
nie odpowiadają swemu powołaniu, swemu w towarzystwach
ludzkich przeznaczeniu, dopokąd ich umiejętność nie nadaje
fabrykom i rękodzielom oświecenia, ułatwienia kierunku postępu.*

Stanisław Staszic

*Pragnę podziękować wszystkim
bez których niniejsza praca nie mogła by powstać.*

*Przede wszystkim mojemu promotorowi i mentorowi
Profesorowi Antoniemu Cieśli,
za wszelką pomoc jaką mi udzielił
w czasie dotychczasowej współpracy,
a zwłaszcza za cenne uwagi merytoryczne.*

*Składam serdeczne podziękowania
Panu profesorowi Czesławowi Kapuście
za umożliwienie przeprowadzenia badań fizycznych
oraz cenne wskazówki i okazaną pomoc.*

*Pragnę podziękować również koleżankom i kolegom z pracy
za stworzenie wspaniałej atmosfery naukowej (i nie tylko).*

Dziękuję Rodzicom za wsparcie i zachętę.

*Szczególne podziękowania składam mojej Żonie Agnieszce
za cierpliwość, wyrozumiałość i wsparcie w chwilach zwątpienia.*

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń	8
Wprowadzenie	10
1. Wstęp	14
1.1. Stan badań na świecie	14
1.2. Obiekty biologiczne w polu magnetycznym.....	18
1.2.1. Wpływ pola magnetycznego na jony magnetyczne w organizmach żywych.....	21
1.2.2. Wpływ pola magnetycznego na pierwiastki magnetyczne w organizmach żywych.....	22
1.2.3. Rola pierwiastków magnetycznych w procesach życiowych	24
1.2.4. Stany magnetyczne jonów w związkach biologicznych.....	26
1.2.5. Wolne rodniki	27
1.2.6. Kowalencyjne wiązania jonów magnetycznych w molekułach biologicznych	28
1.3. Energia oddziaływań wewnątrzatomowych i międzyatomowych.....	29
1.4. Wpływ wody poddanej obróbce polem magnetycznym na organizmy żywe	32
1.5. Wpływ pola magnetycznego Ziemi na organizmy żywe, magnetotropizm	33
2. Struktura ziarniaków i nasion.....	35

2.1. Ziarniak pszenicy i nasiona lnianki jako wielowarstwowa sferoida spłaszczona.....	35
2.2. Badania ziarniaka pszenicy mikroskopem skaningowym	37
2.3. Badania nasion lnianki mikroskopem skaningowym.....	42
2.4. Badania stężenia pierwiastków w ziarniaku pszenicy	48
2.4.1. Podstawy metody analizy fluoroscencyjnej.....	48
2.4.2. Aparatura do analizy fluoroscencyjnej	50
2.4.3. Wyniki pomiarów	51
3. Badanie rozkładu i stopnia utlenienia żelaza w ziarniakach pszenicy i nasionach lnianki oraz magnetyzm ziarniaka pszenicy.....	53
3.1. Opis metody pomiarowej XAS	53
3.2. Wyniki pomiarów	55
3.3. Analiza widm XANES	56
3.3.1. Wyniki uśrednione	56
3.3.2. Rozkład zawartości Fe w ziarniaku pszenicy	58
3.3.3. Rozkład zawartości Fe w nasionach lnianki (rydza).....	60
3.4. Wnioski z przeprowadzonych badań XANES.....	62
3.5. Badania właściwości magnetycznych ziarniaków pszenicy	62
3.5.1. Podstawy magnetyzmu	62
3.5.2. Metoda pomiarowa i aparatura – magnetometr z wibrującą próbką	65
3.5.3. Wyniki pomiarów magnetometrycznych ziarniaka pszenicy	68
3.5.4. Wnioski z badań właściwości magnetycznych	71
4. Opis matematyczny sferoidy spłaszczonej.....	72
4.1. Współrzędne sferoidy spłaszczonej	73
4.1.1. Równanie Laplace'a we współrzędnych sferoidy spłaszczonej	74
4.1.2. Natężenie pola magnetycznego wokół namagnesowanej sferoidy spłaszczonej	76
4.1.3. Natężenie pola magnetycznego wewnątrz sferoidy spłaszczonej umieszczonej w jednorodnym polu magnetycznym	77

4.2. Jednorodnie namagnesowana sferoida w układzie współrzędnych kartezyjskich.....	77
4.2.1. Zewnętrzne pole magnetyczne pochodzące od jednorodnie namagnesowanej sferoidy spłaszczonej.....	83
4.2.2. Natężenie pola magnetycznego wewnątrz sferoidy spłaszczonej umieszczonej w jednorodnym polu magnetycznym.....	84
4.3. Numeryczna analiza rozkładu pola magnetycznego.....	85
4.3.1. Założenia upraszczające obliczenia.....	85
4.3.2. Rozkład natężenia pola magnetycznego dla sferoidy spłaszczonej umieszczonej w jednorodnym polu magnetycznym.....	85
4.3.3. Rozkład natężenia pola magnetycznego dla jednorodnie namagnesowanej sferoidy spłaszczonej.....	88
4.3.4. Wnioski z analizy numerycznej rozkładu pola magnetycznego.	89
5. Urządzenia wzbudzające pole magnetyczne przydatne w biostymulacji organizmów żywych.....	91
5.1. Biostymulacja polem magnetycznym wzbudzonym cewką z uzwojeniem klasycznym.....	92
5.2. Biostymulacja polem magnetycznym wzbudzonym elektromagnesem nadprzewodnikowym.....	94
5.2.1. Elektromagnes nadprzewodnikowy firmy Oxford Instruments..	94
5.2.2. Elektromagnes nadprzewodnikowy firmy Sumitomo Electric Industries, Ltd.	97
5.3. Biostymulacja polem magnetycznym wzbudzonym magnesami trwałymi.....	98
6. Badania eksperymentalne.....	101
6.1. Badania wstępne.....	102
6.2. Materiał i metodyka oceny wpływu biostymulacji magnetycznej.....	103
6.2.1. Zdolność kiełkowania.....	104
6.2.2. Wskaźnik szybkości kiełkowania wg Maguire'a.....	105
6.2.3. Wskaźnik średniego czasu kiełkowania jednego ziarniaka wg Piepera.....	105

6.3. Biostymulacja nasion zmiennym polem magnetycznym o częstotliwości 50 Hz.....	106
6.3.1. Wyniki biostymulacji ziarniaków pszenicy	106
6.3.2. Wyniki biostymulacji nasion lnianki	108
6.4. Biostymulacja nasion stałym w czasie polem magnetycznym	111
6.4.1. Wyniki biostymulacji ziarniaków pszenicy	111
6.4.2. Wyniki biostymulacji nasion lnianki	112
6.5. Zależność wskaźników kiełkowania od dawki ekspozycyjnej	117
6.6. Podsumowanie badań przedśiewnej biostymulacji nasion	123
7. Podsumowanie i wnioski.....	124
Spis literatury.....	127

Wykaz ważniejszych oznaczeń

- H** – wektor natężenia pola magnetycznego [Am^{-1}],
B – wektor indukcji pola magnetycznego [T],
A – wektorowy potencjał magnetyczny [Vsm^{-1}],
M – wektor magnetyzacji, namagnesowanie [Am^{-1}],
 V_m – skalarny potencjał magnetyczny [A],
 χ – podatność magnetyczna,
 μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-1}$ [Hm^{-1}],
 μ_r – przenikalność magnetyczna względna,
 e – ładunek elektronu [C],
 N_A – liczba Avogadro [mol^{-1}],
 c – prędkość światła w próżni $c = 3 \cdot 10^8$ [ms^{-1}],
 Z – liczba atomowa pierwiastka ośrodka,
 A – liczba masowa pierwiastka ośrodka,
 λ – długość fali promieniowania,
 τ – masowy współczynnik fotoelektrycznej absorpcji ośrodka,
 μ – moment magnetyczny [Am^2],
 μ_B – magneton Bohra [JT^{-1}],
 k_B – stała Boltzmanna [JK^{-1}],
 x, y, z – współrzędne kartezjańskie,
 η, θ, ψ – współrzędne sferoidy spłaszczonej,
 P_p^q – stowarzyszona funkcja Legendre’a pierwszego rodzaju (rzędu q i stopnia p),

- Q_p^q – stowarzyszona funkcja Legendre’a drugiego rodzaju (rzędu q i stopnia p),
- \mathbf{n} – wektor jednostkowy normalny,
- D – dawka ekspozycyjna [Jm^{-3}s],
- ρ_m – gęstość ładunku magnetycznego,
- ρ_{em} – gęstość energii pola magnetycznego [Jm^{-3}],
- t_e – czas ekspozycji [s],
- WSK – wskaźnik szybkości kiełkowania wg Maguire’a,
- $WSCK$ – wskaźnik średniego czasu kiełkowania jednego ziarniaka wg Piepera,
- m – liczba skiełkowanych ziarniaków w kolejnych dniach obserwacji,
- d – numer dnia od wysiewu ziarniaków.

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 przedśiewnej obróbki nasion stymulują przebieg zmian fizjologicznych i biochemicznych w nasionach, są zatem bezpieczne dla środowiska [141]. 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 [121].

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 przedśiewna 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.

Przedmiotem pracy jest oddziaływanie pola magnetycznego na organizmy żywe, w szczególności na ziarniaki i nasiona roślin. Do badań zostały wybrane ziarniaki pszenicy. Pszenica jest najczęściej uprawianym i najbardziej popularnym zbożem w przemyśle spożywczym. Do badań użyto również nasion lnianki. Lnianka (inaczej rydz), jest obecnie mało popularną rośliną oleistą, wytwarza się z niej olej rydzowy. Olej rydzowy jest wpisany do unijnego rejestru „Gwarantowanych Tradycyjnych Specjalności” (GTS), może być również wykorzystywany jako komponent biopaliwa. Przedstawione zostały obserwacje ziarniaków pszenicy i nasion lnianki w mikroskopie skaningowym. Dzięki tym badaniom został określony ich kształt a także budowa wewnętrzna. Przeprowadzona analiza stężenia pierwiastków, rozkładu żelaza oraz jego lokalnego otoczenia, a także badania właściwości magnetycznych pozwoliły na stworzenie ich modelu matematycznego. Model ten pozwala obliczyć rozkład natężenia

poła magnetycznego dla pojedynczego ziarniaka umieszczonego w polu magnetycznym. Przewidywana biostymulacja polem magnetycznym przeprowadzona dla ziarniaków pszenicy i nasion lnianki oraz analiza wskaźników kiełkowania, miała na celu potwierdzenie założonej tezy.

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.

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,
- przewidywana biostymulacja ziarniaków pszenicy silnym stałym polem magnetycznym,
- przewidywana biostymulacja ziarniaków lnianki zmiennym o częstotliwości 50 Hz i stałym polem magnetycznym nasion lnianki.

Praca obejmuje siedem rozdziałów.

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 przewidywanej 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 ziarniaku 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 zestawiał wnioski wynikające z poszczególnych badań i obserwacji.

Rozdział 1

Wstęp

1.1 Stan badań na świecie

Przed 2600 lat Tales z Miletu zauważył, że jedna z rud żelaza: magnetyt, przyciąga żelazo. Jest to pierwsza wzmianka o zjawisku magnetyzmu, wtedy nie potrafiono tego zjawiska nazwać ani opisać [194]. W 1558 roku Neapolitańczyk Giambattista della Porta przedstawił teorie na temat magnetyzmu w dziele „*Magia naturalis*”, wydanym w czterech księgach, które zawierały najprostsze przepisy na temat zastosowania magnezu. Po roku Porta rozszerzył swoje dzieło o 16 ksiąg, opisując w nich pozostałe zjawiska fizyczne, w tym proste doświadczenia z badaniem widma magnetycznego za pomocą opiłków żelaza, powstawanie magnesów z przelamywania innych magnesów i ciekawy pomysł użycia wagi do pomiarów magnetycznych [179]. Na początku XVII wieku William Gilbert napisał dzieło „*De Magnete*”. Opisał w nim własne doświadczenia prowadzone przez kilkanaście lat, obalając większość mitów związanych z magnetyzmem. Prace nad magnetyzmem rozwijają się w XIX w. za sprawą odkryć Hansa Oersteda, Michaela Faradaya, Andre-Marie Amprere’a, jednocześnie wzrasta zainteresowanie badaczy nad oddziaływaniem magnetyzmu na różne substancje [64]. Pierwszą pracę dotyczącą wpływu pola magnetycznego na rozwój roślin datuje się na 1876, autorem pracy jest J. Reinke. W swoich eksperymentach nie stwierdził jednak żadnego wpływu pola magnetycznego na kiełkowanie nasion i wzrost roślin. Dopiero kilkanaście lat później, w 1893 roku, Tolomei opublikował pracę, w której opisał pozytywny wpływ pola magnetycznego skutkujący przyspieszeniem wzrostu roślin. Był również pierwszym naukowcem stwierdzającym zjawisko magnetotropizmu [60, 121].

Najbardziej popularnymi roślinami badanymi pod kątem stymulacji polem magnetycznym są zboża. Pszenica jest jednym z najczęściej uprawianych zbóż, dąży się do uzyskania jak największych plonów w jak najlepszej jakości. Pierwsze udokumentowane badania nad wpływem pola magnetycznego na pszenice przeprowadził Savostin, udało mu się uzyskać siewki pszenicy o 100% dłuższe od przeciętnych [150]. Pozytywne wyniki zachęciły innych naukowców do badania wpływu pola magnetycznego na kiełkowanie i wzrost tego gatunku. Ziarniaki były poddawane działaniu pola stałego oraz zmiennego o wartości od kilku μT do 10 T i różnych czasów ekspozycji od kilku sekund do permanentnego działania do końca trwania eksperymentu (badanie kiełkowania i początkowego wzrostu) [5, 6, 9, 24, 25, 51, 54, 55, 80, 81, 82, 94, 95, 97, 99, 102, 107, 111, 112, 118, 119, 120, 121, 122, 124, 125, 127, 128, 129, 130, 133, 151, 160, 173, 178]. Tylko cztery z przedstawionych pozycji literaturowych nie potwierdziły pozytywnego wpływu pola magnetycznego na ziarniaki pszenicy [24, 25, 54, 118], w pozostałych przypadkach badane parametry: szybkość i zdolność kiełkowania, energia kiełkowania i inne, były lepsze w porównaniu z nasionami nie stymulowanymi. Na uwagę zasługują prace Pietruszewskiego [83, 120–127, 129]. Stymulował on polem magnetycznym stałym oraz zmiennym o częstotliwości 50 Hz ziarniaki pszenicy, a następnie przeprowadzał nie tylko próby laboratoryjne ale również i polowe. Otrzymane wyniki pozwoliły stwierdzić, że zastosowanie przedśiewnej biostymulacji ziarniaków pszenicy spowodowało szybsze pobieranie wody przez nasiona, przyśpieszyło kiełkowanie ziarniaków, nasiona stymulowane równomierniej kiełkowały, dzięki temu pszenica wcześniej rozpoczynała vegetację dając wzrost plonów oraz lepiej wypełnione kłosa. Stwierdzono także u nasion stymulowanych polem magnetycznym wzrost zawartości glutenu. Ziarniaki otrzymane z roślin już stymulowanych poddano przedśiewnej biostymulacji, biostymulacji ziarniaków w drugim pokoleniu wpłynęła w negatywny sposób na wysokość plonów. Przeprowadzono analizę wypiekową, jednak nie wykazała ona żadnych znaczących różnic w stosunku do wypieku kontrolnego. Warto odnotować, że stymulowane ziarniaki posiadają większą odporność na czynniki chorobotwórcze, stres oksydacyjny oraz toksyczność metali ciężkich [159, 160].

Kolejnym zbożem, które ma szerokie zastosowanie w przemyśle spożywczym oraz rolnictwie jest kukurydza. Ziarniaki kukurydzy były poddawane przedśiewnej biostymulacji następnie badano ich kiełkowanie i początkowy wzrost [8, 57, 65, 73, 74, 84, 108, 153, 154, 173, 200]. Ziarniaki były poddawane działaniu pola stałego oraz zmiennego o wartości od 5 μT do 1 T i różnych czasów ekspozycji. We wszystkich przedstawionych publikacjach autorzy zaprezentowali pozytywny wpływ działania pola magnetycznego stałego jak i zmiennego. Stymulowane ziarniaki szybciej kiełkowały, ich korzenie były dłuższe niż nasion kontrolnych (niestymulowanych).

Pozytywne wyniki przedśiewnej stymulacji ziarniaków uzyskano w badaniach nad innymi zbożami: jęczmieniem [18, 49, 86, 96, 116, 162, 163, 180], ryżem [28, 56], owsem [91, 180], prosem [18]. Efekty były podobne do wcześniej opisywanych czyli między innymi szybsze kiełkowanie w porównaniu do kontroli.

W Polsce wiodącym zespołem badającym wpływ pola magnetycznego na organizmy żywe w szczególności na rośliny jest zespół Prof. Pietruszewskiego

z Katedry Fizyki Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie. Opublikowane prace przedstawiają badania nad wpływem stałego oraz zmiennego pola magnetycznego o częstotliwości 50 Hz, na przedświnną stymulację ziarniaków różnych roślin: pszenicy jarej, pszenicy ozimej, jęczmienia, kukurydzy, oraz nasion gryki, słonecznika, rzodkwi, fasoli, fasoli szparagowej, groszku, bobu, bobiku, kolendry, kapusty włoskiej, ogórka, pomidora, cebuli, sałaty lodowej, marchwi, buraka cukrowego [84, 125, 127, 138 – 146]. Przedstawione wyniki potwierdzają pozytywny wpływ pola magnetycznego, w postaci szybszego wchłaniania wody, równiejszego i lepszego kiełkowania. Wszystko to wpływa na uzyskanie wyższych plonów o lepszej jakości.

Przedświnnę biostymulacji zostały poddane również nasiona buraka cukrowego, wyniki pokazały wzrost plonów oraz zawartości cukru o około 7 % [160, 195].

Aladjajjyan [7] badała wpływ stymulacji stałym polem magnetycznym na nasiona tytoniu, uzyskane badania wykazały zwiększenie energii kiełkowania oraz zwiększyła się liczba wykiełkowanych nasion.

Przeprowadzane badania na nasionach soi wykazały pozytywny wpływ działania pola magnetycznego; więcej nasion wykiełkowało, a stymulowane nasiona miały dłuższe korzenie i kielki [26, 115].

W Rumunii jednym z najczęściej uprawianych kwiatów jest mieczyk. Plantatorom zależy na jak największych plonach i jakości kwiatu tej rośliny. Stymulacja cebulek mieczyka przeprowadzona była w polu 0,3 mT. Cebulki mieczyka poddane działaniu pola magnetycznego szybciej kiełkowały a długość ich kielków oraz korzeni była większa [27].

Celestino i współpracownicy [29, 30] badali długotrwały wpływ zmiennego pola magnetycznego na nasiona dębu korkowego, nasiona w polu magnetycznym szybciej kiełkowały miały o około 15% dłuższe kielki i pierwsze korzenie.

Dattilo [48] badał nasiona kiwi w zmiennym polu magnetycznym, dało ono pozytywny efekt w postaci szybszego kiełkowania oraz dłuższych kielków.

Majd i Kornarzyński [93, 84] badali kiełkowanie i początkowy wzrost nasion kapusty stymulowanych przed wysianiem stałym oraz zmiennym polem magnetycznym. Wynik badań pokazał, że nasiona stymulowane wykiełkowały w większej liczbie, a po 5 dniach kielki i korzenie stymulowanych nasion były dłuższe.

Novitsky i jego zespół [113] badali wpływ słabego pola magnetycznego na kiełkowanie i początkowy wzrost nasion rzodkiewki oraz dwóch odmian cebuli. Wyniki pokazały pozytywny wpływ pola magnetycznego na badane parametry obu gatunków roślin. Pozytywny wpływ pola magnetycznego na nasiona rzodkiewki można znaleźć w publikacjach [176, 182, 196, 197].

Moon [106] przeprowadził badania nad kiełkowaniem nasion pomidora w polu elektrycznym i magnetycznym. Nasiona stymulowane oboma rodzajami pól kiełkowały szybciej niż ziarniaki kontrolne nie poddane działaniom żadnego pola. Wyniki pozytywnego działania pola magnetycznego potwierdzono w badaniach opisanych w publikacjach [84, 100, 174, 175].

Nasiona ogórka poddane przedświnnę stymulacji polem magnetycznym szybciej kiełkowały nawet o 44 % oraz większa ich liczba wykiełkowała w porównaniu do nasion kontrolnych nie stymulowanych [61, 66, 199].

Badanie nasion bawełny stymulowanych przed wysiewem polem magnetycznym wykazały znaczącą poprawę w kiełkowaniu nasion, kiełkowanie było szybsze od 22 % do 43 %. Przeprowadzone były też badania polowe; plony roślin wyrosłych z nasion stymulowanych były nawet dwukrotnie większe niż kontrolnych, nie stymulowanych polem magnetycznym [90].

Badania Kimball [75] wykazały wpływ niejednorodnego pola na zahamowanie rozwoju pąków drożdży. Pole jednorodne nie miało żadnego wpływu. Badania Nagy, dotyczące działania stałego oraz zmiennego pola magnetycznego, wykazały zmniejszenie koloni grzybów chorobotwórczych szkodliwych dla roślin o 10%. Natomiast badania Piskorz–Bińczyckiej [137] nad wpływem stałego pola magnetycznego na wzrost koloni penicyliny w połączeniu ze światłem oraz w zaciemnionym pomieszczeniu, wykazały znaczne przyspieszenie tego wzrostu koloni szczególnie w połączeniu pola magnetycznego w ciemności.

Elahee [52] w badaniach wpływu pola magnetycznego na pantofelki i orzęski nie zauważył istotnego działania pola na szybszy ich rozwój. Wszystkie wyniki mieściły się w granicach błędu statystycznego.

Kobayashi [78] badał wpływ stałego i zmiennego pola magnetycznego na kiełkowanie nasion rogatka, z przedstawionych badań wynika, że nasiona stymulowane polem magnetycznym kiełkowały szybciej o 15%.

Z badań Yacyli [198] wpływu pola magnetycznego na nasiona cesarskiego drzewka wynika, że ma ono pozytywny wpływ na liczbę wykiełkowanych nasion, ich długość oraz zwiększa się zawartość m. in. chlorofilu.

Przedmiotem badań wpływu pola magnetycznego na rośliny były również rośliny motylkowe. Nasiona grochu poddane przed wysiewem wpływowi pola magnetycznego szybciej kiełkowały, kiełki miały większą długość oraz masę w początkowym wzroście, stymulowane nasiona szybciej pobierały wodę z otoczenia [98, 138–140, 143, 145, 146, 155, 164]. Nasiona bobu szybciej kiełkowały [72, 139, 155]. Traktowanie polem magnetycznym nasion łubinu białego, spowodowało przyrost plonu, był on konsekwencją większej obsady strąków na roślinach [145]. Polem magnetycznym przed wysiewem były poddawane nasiona bobiku, wpłynęło ono dodatnio na wschody roślin oraz modyfikowało przebieg poszczególnych faz rozwoju bobiku. Efektem były szybsze wschody, zakwitanie oraz dojrzewanie roślin [143, 146].

Wyniki stymulowania nasion słonecznika stałym polem magnetycznym przedstawiono w [58, 189]. Nasiona poddane działaniu pola magnetycznego szybciej wykiełkowały, kiełki miały większą masę oraz były dłuższe.

Jak wynika z przedstawionego stanu badań, wpływu pola magnetycznego na kiełkowanie i wzrost roślin, zakres ich jest bardzo szeroki. Otrzymywane rezultaty zainspirowały Autora do podjęcia badań w tym zakresie.

1.2 Obiekty biologiczne w polu magnetycznym

Wpływ pola magnetycznego na rozwój roślin jest przedmiotem badań od przeszło 150 lat. Pierwszą udokumentowaną pracę opublikował Reinke w 1876 roku, prowadzone wówczas przez niego prace nie potwierdziły jednak żadnej reakcji oddziaływania pola na badane rośliny. Jednak już w 1893 Tolomiei udokumentował efekt szybszego kiełkowania w polu magnetycznym [121].

W 1903 r. stwierdzono zmniejszenie lub zamieranie ruchu cytoplazmy u roślin wodnych (*Valisneria* i *Chara*) umieszczonych w polu magnetycznym. Badano różne usytuowania ruchu cytoplazmy w roślinach w stosunku do linii sił pola magnetycznego: prostopadłe i równoległe. Przy równoległym usytuowaniu linii pola nie stwierdzono zmian ruchu cytoplazmy. Efekt oddziaływania „prostopadłego pola” został potwierdzony także w późniejszych badaniach. Zaobserwowano również, że w silnym, równoległym do ruchu cytoplazmy polu (rzędu 10^5 A/m), ruch cytoplazmy maleje o 15 – 30%. W „polu prostopadłym” częściej zachodzi przyspieszenie niż zwolnienie ruchu cytoplazmy. Odkryto również, że pole magnetyczne przyspiesza wzrost korzeni roślin i zwiększa przepuszczalność błony komórkowej. Dalsze badania potwierdziły te efekty i ujawniły inne aspekty działania pola magnetycznego na rośliny [121, 150].

Na podstawie dostępnej literatury można stwierdzić, że działanie pola magnetycznego na umieszczone w nim obiekty biologiczne jest wielorakie. Poniżej Autor dokonał syntetycznego zestawienia niektórych aspektów takiego działania. Wynika z niego wieloaspektowość poruszanych problemów badawczych. W wielu ośrodkach w kraju i zagranicą podejmowane są próby wyjaśnienia podstawowych mechanizmów fizycznych związanych z biologicznymi efektami oddziaływania pola magnetycznego i oceną wartości natężenia pola przy której te efekty występują.

Pole magnetyczne może oddziaływać na żywe organizmy poprzez:

- oddziaływanie elektrodynamiczne z występującymi w organizmach prądami elektrycznymi (siła Lorentza i efekt Halla),
- efekt Ettingshausena, polegający na generacji różnicy temperatury na płaszczyznach prostopadłych do kierunku pola magnetycznego,
- ruch organizmu żywego w polu magnetostatycznym (może być on przyczyną indukowania prądów),
- powstawanie efektów magnetomechanicznych wewnątrz organizmów polegających na orientacji struktur o anizotropii magnetycznej w polach jednorodnych oraz przesunięcia substancji ferromagnetycznych i paramagnetycznych w polach mających niezerowe gradienty,
- oddziaływanie na nieskompensowane spiny magnetyczne pierwiastków paramagnetycznych i wolnych rodników,

- efekt Zeemana, czyli rozszczepianie się linii widmowych atomów umieszczonych w polu magnetostaticznym na składowe różniące się nieco liczbami falowymi,
- efekt Dorfmana, polegający na przeorientowaniu się protein w polu magnetostaticznym wskutek anizotropii tych molekuł,
- denaturacje, renaturacje i koagulacje cząstek białka, czyli zmiany aktywności biologicznej tych cząstek,
- oddziaływanie na struktury o właściwościach piezoelektrycznych,
- oddziaływanie na bioplazmę, sprzęganie zewnętrznych pól magnetycznych z procesami w organizmach żywych.

Ponadto:

- zewnętrzne pole magnetyczne zmienia właściwości ciekłych kryształów i w związku z tym może wpływać na właściwości membran, organelli komórkowych, a w konsekwencji bardziej złożonych układów,
- niektóre składniki organizmów żywych wykazują właściwości magnetostrykcyjne; istnieje zatem możliwość oddziaływania na takie składniki,
- pole magnetyczne zmienia energię oddziaływań wewnątrzatomowych i międzyatomowych w organizmach żywych,
- sinusoidalnie zmienne pole magnetyczne powoduje indukowanie się prądów wewnątrz żywych organizmów,
- pole magnetyczne może wywierać wpływ na depolaryzację komórek. Zjawiska rezonansowe wskutek przenikania pola magnetycznego mogą zachodzić nie tylko w przestrzeni pozakomórkowej, lecz także w błonie komórkowej (czyli też w kanałach jonowych) oraz we wnętrzu komórki,
- pole magnetyczne ma wpływ również na wodę, która poddana działaniu zewnętrznego pola magnetycznego zmienia swoje właściwości: wzrasta szybkość krystalizacji, stężenie rozpuszczonych gazów, szybkość koagulacji i osiadania zawieszin. Zmienia się pH i zdolności zwilżania.

Do powyższego zestawienia Autor wykorzystał następujące źródła [1, 2, 4, 16, 17, 20, 21, 22, 46, 62, 85, 109, 136, 148, 150, 161, 165, 168, 187, 190 191, 194, 201, 202].

Badania wpływu pola magnetycznego na organizmy żywe, w aspekcie wyżej wymienionych czynników, podzielić można – w zależności od rodzaju efektów – na dwie grupy: mikroskopowe i makroskopowe.

W pierwszej grupie badań zakłada się, że mechanizm efektów biomagnetycznych opiera się na zjawiskach fizycznych zachodzących na poziomie molekularnym lub nawet atomowym. Część naukowców uważa, że zasadniczy wpływ na efekty biomagnetyczne ma orientacja cząsteczek dia- i paramagnetycznych w polu magnetycznym, kolejna grupa badaczy przypuszcza, że pole magnetyczne może

spowodować zmiany kątów walencyjnych w cząsteczkach, a jeszcze inni zwracają uwagę na orientację spinu cząsteczek w polu magnetycznym [20, 21, 150, 191].

W drugiej grupie badań zwraca się uwagę na fakt, że makrocząsteczki białka normalnie mające właściwości diamagnetyczne i symetrię osiową powinny wykazywać silną anizotropię magnetyczną (różnicę podatności magnetycznej wzdłuż i w poprzek osi cząsteczki) rzędu $\Delta\chi = 10^{-22}$. Dzięki temu w roztworze białkowym, umieszczonym w jednorodnym polu magnetycznym o natężeniu $H = 10^6 - 10^7$ A/m mogłaby nastąpić całkowita, stuprocentowa orientacja makrocząsteczek. Natomiast w polu niejednorodnym o gradencie natężenia pola $dH/dx = 10^6$ A/m² orientacja tego typu mogłaby spowodować powstanie odpowiedniego gradientu koncentracji cząsteczek białkowych w roztworze. Jednak w stosunkowo gęstych roztworach biologicznych powstanie takiej równowagi orientacyjnej dla cząsteczek anizotropowych jest mało prawdopodobne. Oprócz tego ruchy cieplne mogą deformować orientację makrocząsteczek w polu. Efekt ten można pominąć pod warunkiem, że energia pola magnetycznego, w przeliczeniu na jedną cząsteczkę, będzie przekraczała wartość energii termicznej kT . Jest to możliwe tylko dla pól o dużych natężeniach, powyżej 10^7 A/m [150].

Tymczasem inni autorzy [136, 191] twierdzą, że siły przyciągania międzycząsteczkowego ułatwiają uporządkowanie i mogą ułatwić orientacje cząsteczek w polu magnetycznym na tle ruchów termicznych. Jest to możliwe już przy natężeniach pola rzędu 10^4 A/m. Również przewidują możliwość powstawania efektów biomagnetycznych już przy stosunkowo niedużych wartościach natężenia pola magnetycznego rzędu 10^5 A/m. Według nich, efekty biomagnetyczne mogą być skutkiem orientacji momentów magnetycznych niesparowanych elektronów w wolnych rodnikach, która następuje pomimo destrukcyjnego wpływu ruchów cieplnych. Dopuszcza on również możliwość istnienia innego mechanizmu powstawania efektu biomagnetycznego: degradacja kątów walencyjnych cząsteczek paramagnetycznych [191].

Rozpatrując kwantowo-mechaniczny model mechanizmu oddziaływania pola magnetycznego, wprowadza się wskaźnik zwolnienia reakcji biochemicznych, który wyraża się stosunkiem liczby cząsteczek znajdujących się na niskim poziomie stabilności (moment magnetyczny równoległy do kierunku pola) do liczby cząsteczek znajdujących się na wysokim poziomie stabilności (moment magnetyczny antyrównoległy do pola).

W latach 60-tych ubiegłego wieku wysunięto hipotezę, że wewnątrz cząsteczki wody umieszczonej w polu magnetycznym mogą zachodzić orto-para-przejścia (przejścia cząsteczki wody ze stanu -orto, przy którym spiny protonów obydwu atomów wodoru są do siebie równoległe – skierowane zgodnie, w stan -para, przy którym spiny atomów są antyrównoległe – skierowane przeciwnie). Niezbędna do tego energia magnetyczna (w przeliczeniu na jedną cząsteczkę) jest stosunkowo mała, kilkaset razy mniejsza niż np. energia potrzebna do rozerwania słabych wiązań wodorowych w cząsteczce. W wyniku orto-para-przejęć w roztworach wodnych mogą powstawać obszary równoległej orientacji spinów wodoru, co z kolei spowoduje wypychanie z tych obszarów rozpuszczonych w wodzie substancji.

Ogólnie można stwierdzić, że większość autorów wychodząc z rozważań i obliczeń teoretycznych, opartych na koncepcjach mikro- lub makroskopowych, dochodzi do wniosku, że powstawanie efektów biomagnetycznych jest możliwe tylko przy dostatecznie dużych natężeniach pola magnetycznego co najmniej rzędu 10^5 A/m [4, 136, 150, 191, 194].

1.2.1 Wpływ pola magnetycznego na jony magnetyczne w organizmach żywych

Badania magnetyczne organizmów żywych stanowią część biofizyki. Obejmują:

- 1) badania właściwości jonów magnetycznych znajdujących się w molekułach biologicznych,
- 2) badania wpływu pól magnetycznych na stany fizyczne jonów tworzących molekułę, oddzielnych molekuł i ich zespołów w ciekłych kryształach [191].

Jonami magnetycznymi grupy żelaza są tytan, wanad, chrom, mangan, żelazo, kobalt, nikiel i miedź. Ponadto spotykanym w organizmach pierwiastkiem magnetycznym jest molibden. Z punktu widzenia magnetycznego interesujące jest to, że jony te występują we wszystkich możliwych stanach magnetycznych. W pewnych molekułach jony te mają wysoki spin, w pewnych niski a w pewnych – jak np. żelazo – zarówno niski, jak i wysoki, zależnie od funkcji, jaką spełniają. Rola, jaką jony magnetyczne odgrywają i wpływ ich zróżnicowanych stanów magnetycznych na procesy życiowe są celem wielu badań magnetycznych [150, 191, 194].

Bogactwo stanów magnetycznych zwiększone jest w dynamicznych procesach życiowych, w których ten sam jon magnetyczny znajdujący się w określonej cząsteczce spełniać może różne funkcje.

Aspekt drugi jest nie mniej interesujący, aczkolwiek mało zbadany nie tylko w organizmach żywych, ale i poza nimi. Jony magnetyczne w molekułach biologicznych zajmują z reguły pozycje centralne, tzn. otoczone są jonami i grupami jonów diamagnetycznych, chociaż bardzo niewielkie liczby jonów magnetycznych występują w stanie wolnym. Jony diamagnetyczne wytwarzają pola elektrostatyczne rozszczepiając częściowo poziomy energetyczne jonów magnetycznych. W takich stanach, traktowanych jako normalne, jony te wraz z otaczającymi je związkami wypełniają swoje funkcje. Stan ich jednak poważnie zmienia się, jeśli zastosować zewnętrzne pole magnetyczne. Okazuje się, że w zależności od wielkości pola magnetycznego intensywność ta maleje lub wzrasta. Przy niewielkich natężeniach pola magnetycznego nie obserwuje się żadnych zmian w stosunku do procesów normalnych, a przy bardzo silnych organizmy żywe zamierają, szczególnie wówczas, kiedy poddane są działaniu pola przez czas dłuższy. Badania komplikuje fakt, że nie dla wszystkich organizmów jednakowe są granice, od których zaczynają się pola słabe i silne.

Poza kompleksami magnetycznymi opisanymi wyżej większość molekuł i ich zespołów jest diamagnetyczna. Pole magnetyczne również na nie wywiera wpływ. Dotyczy to szczególnie diamagnetycznych ciekłych kryształów, które obficie występują w organizmach.

Ważne zatem dla całokształtu procesów życiowych są zarówno badania indywidualnych cech jonów magnetycznych, jak i kompleksów, w skład których wchodzi.

Aczkolwiek jonów magnetycznych w organizmach żywych jest stosunkowo niewiele, to jednak rola ich jest bardzo znacząca. Tolerancje zawartości jonów magnetycznych są dość niewielkie i ich przekroczenie natychmiast ujawnia się w występowaniu stanów chorobowych. Pierwiastki magnetyczne są niezbędne dla życia i rozwoju roślin zielonych. W chwili obecnej stosuje się na szeroką skalę uzupełnienie nawozów mineralnych tak zwanymi mikroelementami. Z pierwiastków magnetycznych należą do nich: żelazo, mangan, miedź i molibden [191].

1.2.2 Wpływ pola magnetycznego na pierwiastki magnetyczne w organizmach żywych

Pierwiastki magnetyczne znajdują się w każdej komórce organizmu żywego. Niezależnie od tego pewna niewielka ich ilość występuje w stanie wolnym. Ponadto poza pierwiastkami magnetycznymi niektóre cechy magnetyczne wykazują tzw. wolne rodniki, tj. jony lub grupy jonów o nieskompensowanym spinie. Poszczególne składniki żywej komórki różnią się zarówno stężeniem pierwiastków magnetycznych, jak i ich rodzajem.

Pierwiastki magnetyczne znajdują się w molekułach enzymów, tj. biokatalizatorów każdej żywej komórki. Enzym zawierający metal składa się z części białkowej i części niebiałkowej, zwanej grupą prostetyczną. Właśnie ta część niebiałkowa zawiera pierwiastki magnetyczne. W przypadkach, kiedy grupa prostetyczna może być oddzielona od enzymu, nosi ona nazwę koenzymu.

Budowa grup prostetycznych jest dość różnorodna. Część enzymów zawiera pierwiastek magnetyczny otoczony grupami organicznymi, w innej części jon magnetyczny jest połączony z białkiem bezpośrednio. Enzymy te noszą nazwę metaloproteidów.

Rolą grup prostetycznych i koenzymów jest przyspieszanie reakcji zachodzących w organizmie przez przenoszenie od donora (dawcy) do akceptora (odbiorcy) elektronów, atomów wodoru i rodników [191].

Niewielka część jonów magnetycznych występuje w organizmach żywych w postaci niezwiązanej. Odgrywają one rolę tzw. aktywatorów enzymatycznych. Zadaniem ich jest uaktywnianie lub zwiększanie aktywności określonych enzymów. Łączą się one z substratem i osłabiając jego wiązania ułatwiają funkcje enzymu.

W skorupie ziemskiej najpowszechniejszym pierwiastkiem magnetycznym jest żelazo. Jest więc rzeczą nieprzypadkową, że w organizmach żywych najwięcej jest właśnie żelaza. Jego stężenie jest ponad stukrotnie większe od stężenia innych

pierwiastków magnetycznych. Enzymy wewnątrz komórki zawierające żelazo związane są z jej wewnętrznymi składnikami lub tkwią w ich wnętrzu.

Jedną z ważniejszych ról, jaką odgrywają pierwiastki magnetyczne w procesach życiowych, jest ich aktywność w procesie oddychania organizmów żywych. W początkowych etapach procesu oddychania katalizatorami są żelazoproteidy, a następnie cytochromy, których rozróżnia się kilka rodzajów. Grupa prostetyczna cytochromów zawiera jony żelaza. Działanie cytochromów polega na przenoszeniu elektronów. Związana z tym jest zmiana wartościowości jonów żelaza $Fe^{2+} \leftrightarrow Fe^{3+}$.

W końcowym etapie procesu utleniania katalizatorem jest tzw. oksydaza cytochromowa, której cząsteczka zawiera cztery jony żelaza i dwa jony miedzi Cu^{2+} . Oprócz więc jonów żelaza aktywną rolę w procesie oddychania komórkowego odgrywają jony miedzi. Poza oksydazą cytochromową enzymami katalizującymi bezpośrednie łączenie cząsteczek O_2 ze związkami organicznymi. Do takich enzymów należą katecholaza i oksydaza kwasu askorbinowego. Jonami magnetycznymi są tu jony dwuwartościowe miedzi, są to enzymy rozpowszechnione u roślin. Katecholaza katalizuje proces utleniania katecholu. Spotykana jest szczególnie w pieczarkach, ziemniakach, bananach itp. powodując ciemnienie ich powierzchni po przekrojeniu.

Odrębną grupę enzymowa zawierających żelazo dwuwartościowe stanowią enzymy rozkładające toksyczny nadtlenek wodoru H_2O_2 powstający podczas reakcji metabolicznych. Należy do nich katalaza oraz peroksydaza, znaleziona w chrzanie. Peroksydaza zawiera jeden jon żelaza hemowego na cząsteczkę, enzymu [145].

Fotosynteza jest procesem zapewniającym życie na Ziemi, dzięki niej mogą żyć, rozwijać się i rozmnażać zarówno te organizmy, w których ona zachodzi (zawierające barwniki czynne znajdujące się w chloroplastach), jak i te, których pożywieniem są rośliny fotosyntezujące. Niezwykle istotną rolę w procesie fotosyntezy odgrywają jony żelaza ($Fe^{2+} \leftrightarrow Fe^{3+}$) związane niehemowo z pewnego rodzaju białkiem. Związek ten nosi nazwę ferredoksyny. Aktywną rolę odgrywają w tych procesach również wspomniane już cytochromy.

Poza żelazem i miedzią istotną rolę w organizmach żywych odgrywają jony kobaltu. Wykryto je pierwotnie w witaminie B_{12} zwanej również kobalaminą. Kobalt odgrywa rolę aktywatora pewnych peptydaz.

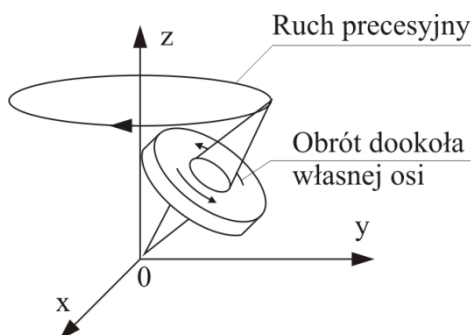
W organizmach żywych występują też jony chromu oraz jony manganu zaobserwowane w wielu reakcjach enzymatycznych. Spełniają one rolę aktywatorów.

Pozostałe jony magnetyczne występują w organizmie w mniejszych ilościach, a ich rola nie została jeszcze precyzyjnie określona. Jest rzeczą znaną, że istnieje pewna proporcjonalność między liczbą jonów magnetycznych pierwszej grupy przejściowej, zawartej w skorupie ziemskiej, a liczbą jonów znajdujących się w organizmach żywych. Jest to zrozumiałe, ponieważ organizmy żywe są twórcami tej Ziemi. Istnieje jednak jeden wyjątek. Jest nim molibden, który występuje rzadko na naszej planecie i rozmieszczony jest nierównomiernie. Dziwne jest zatem to, że wchodzi on w skład komórek organizmów żywych i jest niezbędny do życia [165, 191].

1.2.3 Rola pierwiastków magnetycznych w procesach życiowych

Pierwiastki magnetyczne to takie których atomy posiadają samoistne momenty magnetyczne. Znane z życia codziennego magnesy lub ogólnie biorąc materiały magnetyczne, złożone są z atomów lub jonów magnetycznych ułożonych regularnie w sieci kryształu w formie skondensowanej i stałej. W molekułach biologicznych te same jony zwykle występują pojedynczo w znacznej odległości jeden od drugiego, mniej regularnie i w większości przypadków w formie płynnej, ciekłokrystalicznej, rzadziej stałej.

Podstawową jednostką magnetyzmu jest spinowy moment magnetyczny elektronu μ_B , noszący nazwę magnetonu Bohra. Pojęcie to można zrozumieć dokonując analogii do igły kompasu. Moment magnetyczny, podobnie jak kompas, ma swój biegun pomocny N i południowy S . Jest to zatem wielkość charakteryzująca się nie tylko swoją wartością bezwzględną, ale i kierunkiem. Różnica między igłą kompasu, a momentem magnetycznym elektronu polega między innymi na tym, że igła kompasu może obracać się w zasadzie tylko w płaszczyźnie, ze względu na konstrukcję zawieszenia obudowy, tymczasem moment magnetyczny elektronu może wirować w wielu płaszczyznach. Obok metod mechaniki kwantowej, szereg zjawisk, w tym zjawiska rezonansowe, mogą być opisywane modelami fizyki klasycznej. W takich przypadkach przyjmuje się, że ruch momentu magnetycznego jest analogiczny do ruchu bąka, który obok obrotowego ruchu wokół własnej osi ma ruch tzw. precesyjny wokół innej osi, jak przedstawiono rys. 1.1 [60, 184, 185].



Rys.1.1. Ruch bąka wyobrażający klasyczny ruch momentu magnetycznego [136]

Jeśli w atomie istnieje więcej niż jeden elektron, to momenty magnetyczne mogą być skierowane albo zgodnie, albo część z nich skierowana jest w jednym kierunku, a pozostała część w przeciwnym. Jeśli liczba elektronów z momentami skierowanymi do góry równa się liczbie elektronów z momentami skierowanymi do dołu, to wypadkowy moment otrzymany w wyniku pomiaru równy jest zeru bowiem momenty magnetyczne wzajemnie się kompensują. Jeśli natomiast liczba momentów skierowanych do góry różna jest od liczby momentów skierowanych do dołu, to istnieje pewien wypadkowy moment magnetyczny równy różnicy momentów skierowanych do góry i do dołu. W takich przypadkach istnieją nieskompensowane momenty magnetyczne. Modelowanie opisywanych zjawisk dodatkowo komplikują istniejące w atomie momenty orbitalne. Pierwiastki magnetyczne to takie, które mogą mieć nieskompensowane momenty magnetyczne w orbitalach elektronów d lub f .

W związkach biologicznych pierwiastki te występują niemal wyłącznie w postaci zjonizowanej. Wśród istniejących pierwiastków magnetycznych najliczniej występują w przyrodzie, a tym samym w molekułach biologicznych, pierwiastki grupy żelaza. Zestawienie pierwiastków magnetycznych przedstawia tabela 1.1. Wiersz drugi tabeli określa liczbę elektronów zewnętrznych jonu, a wiersz trzeci liczbę nieskompensowanych momentów magnetycznych [191].

Tabela 1.1. Jony grupy żelaza [136]

Rodzaj jonu	Ti ³⁺ V ⁴⁺	V ³⁺	Cr ³⁺ V ²⁺	Mn ³⁺ Cr ²⁺	Fe ³⁺ Mn ²⁺	Fe ²⁺ Co ³⁺	Co ²⁺	Ni ²⁺	Cu ²⁺
Konfiguracja	3d ¹	3d ²	3d ³	3d ⁴	3d ⁵	3d ⁶	3d ⁷	3d ⁸	3d ⁹
Nieskompensowane momenty w μ_{β}	1	2	3	4	5	4	3	2	1

Poza jonami magnetycznymi grupy żelaza w organizmach żywych stwierdzono występowanie magnetycznych jonów molibdenu i uranu.

Rola pierwiastków magnetycznych w procesach życiowych związana jest z cechami dwójakiego rodzaju:

- 1) cechy niemagnetyczne, jakie mają jony innych metali, a które sprowadzają się do możliwości pobierania lub oddawania elektronów,
- 2) cechy ściśle magnetyczne związane z obecnością nieskompensowanych momentów magnetycznych.

Cechę pierwszą nazwać można cechą elektryczną i trudno niekiedy oddzielić ją od cech magnetycznych, ponieważ ruch elektronów pierwiastków magnetycznych jest ruchem elektronów *d*, tj. elektronów decydujących o właściwościach magnetycznych jonów pierwszej grupy przejściowej.

Wiedza na temat organizmów żywych jest na tyle duża, aby uzmysłwić nam ogromną złożoność procesów jakie w nich zachodzą. Konieczność utrzymania się przy życiu i niezbędność rozwoju, wymagają ustawicznej przemiany jednego rodzaju materii i energii w inny rodzaj. Procesy te wymagają bardzo urozmaiconych o różnej intensywności biokatalizatorów w zależności od zapotrzebowania organizmu na poszczególne składniki. Enzymy zawierające jony magnetyczne cechują się tym, że katalizują procesy o dużej intensywności. Związane jest to właśnie z ich cechami magnetycznymi. Badania przeprowadzone poza organizmami żywymi wykazują, że aktywność katalizatorów zawierających pierwiastki magnetyczne jest ściśle związana ze stanem energetycznym elektronów *d* jonów pierwszej grupy przejściowej.

Ogólnie można powiedzieć, że kompleksy metali przejściowych mają niższą energię tworzenia związku enzym-substrat. Powstanie tego związku, który jest związkiem przejściowym, zawsze wiąże się ze zmianą stanu magnetycznego metalu (lub rodnika). Dzieje się to w dwójaki sposób: albo przez zmianę liczby elektronów *d*, albo przez odwrócenie kierunków momentów magnetycznych elektronów. Tej ostatniej

cechy nie mają metale niemagnetyczne. Dotychczasowa interpretacja zjawisk opiera się na elektrostatycznym oddziaływaniu substratu, a ściślej jego części, na jon magnetyczny. Nie uwzględnia natomiast magnetycznego oddziaływania typu dipolowego na substrat. Nie uwzględnia również oddziaływania wymiennego. Efekt oddziaływań magnetycznych na związki diamagnetyczne jest częścią bardziej ogólnego zagadnienia działania pola magnetycznego na procesy życiowe, w których biorą udział zarówno molekuly diamagnetyczne, nie zawierające w swym składzie nieskompensowanych momentów magnetycznych, jak i paramagnetyczne, które je zawierają.

Znaczenie pierwiastków magnetycznych w organizmach jest ważne i w wielu przypadkach można je określić, jednak mechanizm fizykochemiczny ich działania jest daleki od pełnego zrozumienia. Przede wszystkim, pierwiastki magnetyczne są różnorodne pod względem swych właściwości fizycznych i chemicznych. Ponadto, są one związane w różny sposób i w różnym stopniu ze związkami organicznymi.

Badania chemii nieorganicznej doprowadziły do wniosku, że pierwiastki magnetyczne związane w układzie hemowym oraz związane bezpośrednio z białkiem wykazują większą aktywność chemiczną niż związki metali nie mających wypadkowego spinu. Znane jest zjawisko ścisłego związku szybkości reakcji z wielkością nieskompensowanego momentu magnetycznego elektronów $3d$. Okazuje się, że aktywność katalizatorów jest proporcjonalna do nieskompensowanych momentów magnetycznych [191].

1.2.4 Stany magnetyczne jonów w związkach biologicznych

Biologiczne i fizykochemiczne właściwości związków są ściśle związane ze stanem energetycznym jonów, które je tworzą. Bardzo pomocne przy określaniu tych stanów jest zapoznanie się ze strukturą wewnętrzną jonów. Rozkład elektronów w jonach nie jest równomierny, co pociąga za sobą pewne konsekwencje niezwykle istotne w związkach biologicznych. Można wyróżnić co najmniej trzy podstawowe właściwości molekuł, na które ma wpływ rozkład elektronów w jonach magnetycznych. Pierwszą jest struktura przestrzenna molekuł, drugą wielkość momentu magnetycznego jonu w molekule i trzecią – rodzaj i ilość elektronów przenoszonych w procesach redukcji i utleniania. Są to zatem cechy o fundamentalnym znaczeniu dla zrozumienia roli pierwiastków magnetycznych w procesach życiowych.

Pierwiastki magnetyczne w molekułach biologicznych występują w związkach płynnych, półstałych i rzadziej stałych. Mimo różnego stanu skupienia molekuły, w której występują, zachowują stałą geometrię przestrzenną. Powtarzalność strukturalnych badań eksperymentalnych wskazuje, że konfiguracje geometryczne zawierające pierwiastki magnetyczne są trwałe w stanach normalnych. Odchylenia od stanów normalnych pojawiają się w wyniku zaburzeń spowodowanych np. stanami chorobowymi. Zaletą używanych w takich badaniach metod rezonansowych jest ich czułość zarówno na rodzaj badanego pierwiastka magnetycznego, jak i geometrię molekuły, w skład której wchodzi. Można zatem określać za ich pomocą zarówno

rodzaj pierwiastka i jego stan fizyczny, jak i strukturę geometryczną molekuly. Jak już wspomniano przy omawianiu zasady działania enzymów, odgrywa to istotną rolę w np. określaniu funkcji enzymów i mechanizmu zachodzących procesów fizykochemicznych. Określono już strukturę szeregu związków takich jak cytochromy, kobalaminy itp. Jednak większość związków, w skład których wchodzi pierwiastki magnetyczne, ma budowę jeszcze nieznaną. Dotychczasowe badania wskazują, że jony magnetyczne zajmują pozycje centralne w określonych figurach geometrycznych utworzonych przez jony niemagnetyczne. Ośmiościany są najczęściej występującymi bryłami geometrycznymi odkrytymi dotąd w związkach biologicznych, zawierającymi jony metali magnetycznych. Nadmienić jednak należy, że pewna niewielka liczba pierwiastków magnetycznych spotykana jest w stanie wolnym, a niektóre związane są np. z białkami bezpośrednio.

W centrum ośmiościanu znajduje się pierwiastek magnetyczny, a w narożach ujemne jony diamagnetyczne zwane ligandami. Pole elektrostatyczne, wytwarzane przez nie, ma znaczny wpływ na zwroty momentów magnetycznych, jak i ich inne właściwości fizyczne. W ciałach stałych, poza organizmami żywymi, spotyka się również analogiczne konfiguracje geometryczne, które są bardzo wygodne energetycznie. Dostatecznie powszechną strukturą w centrum, której znajduje się, jon magnetyczny, jest czworościan. Badania eksperymentalne wskazują, że zwroty momentów magnetycznych elektronów $3d$ zależą od rodzajów kationów magnetycznych, ligandów i parametrów oktaedru lub tetraedru [191].

Ze względu na wagę jonów żelaza w substancjach biologicznych należy zwrócić uwagę, że występują one jako kationy dwu- i trójwartościowe oraz z wysokim i niskim spinem, co w sumie daje cztery różne stany. Podkreślić należy, że w przypadku kiedy jony magnetyczne znajdują się w stanie z niskim spinem, energia pola elektrostatycznego ligandów jest większa od energii wymiany wewnątrzjonowej, natomiast kiedy jony znajdują się w stanie z wysokim spinem, stosunek tych energii jest odwrotny. W molekułach biologicznych jest częstym przypadkiem, że dany jon magnetyczny zmienia co chwilę swój stan od niskiego spinu do wysokiego i *vice versa*. Sytuacje takie są ściśle związane z funkcją molekuł biologicznych i dlatego pomiar momentów magnetycznych (lub ściśle z nimi związanej podatności magnetycznej) ma podstawowe znaczenie przy określaniu minimum energii zachodzących procesów życiowych [121, 191].

W ciałach stałych oprócz najczęściej spotykanej pozycji oktaedrycznej jony magnetyczne zajmują między innymi także pozycje tetraedryczne. W tym przypadku kationy metalu otoczone są czterema ligandami w taki sposób, że figura geometryczna z ligandami w wierzchołkach tworzy czworościan. Istnieje możliwość występowania struktur tetraedrycznych również w związkach biologicznych.

1.2.5 Wolne rodniki

Wolnymi rodnikami są jony lub grupy związanych chemicznie jonów z nieskompensowanymi spinami. Ich cechą jest to, że nieskompensowany spin

związany jest z całą molekułą, a nie z określonym jonem, jak to było w przypadku pierwiastków grup przejściowych. Ponadto nie mają one momentów orbitalnych, a tym samym nie istnieje sprzężenie spinowo-orbitalne.

Wolne rodniki powstają w organizmie w sposób ciągły i w sposób ciągły wchodzi w reakcję tworząc określone związki. Ich podstawową cechą jest duża reaktywność chemiczna, w związku z tym stosunkowo krótki czas życia w stanie wolnym. Niemniej organizm podtrzymuje ich stałe stężenie niezbędne do zapewnienia normalnych procesów życiowych. Z punktu widzenia magnetycznego interesujące są z powodu nieskompensowanego spinu. I w tym przypadku duża reaktywność chemiczna związana jest między innymi z właściwościami magnetycznymi rodników. W reakcjach tych nie jest konieczna obecność enzymów.

W wolnym rodniku niesparowany elektron obejmuje większość atomów i znajduje się na orbitalu molekularnym. Ponieważ spin jest sprzężony z siecią poprzez moment orbitalny, to oddziaływania sieci krystalicznej na spin są w tym przypadku bardzo małe. W przypadku związków biologicznych, siecią krystaliczną są jony tworzące molekułę lub rodnik. W enzymach z magnetycznymi jonami metalicznymi oddziaływania sieci na spin są w większości przypadków o wiele większe z racji niepełnego wygaszenia momentu orbitalnego. Jest to powodem, że część białkowa ma stosunkowo znaczny wpływ na stan energetyczny jonów magnetycznych. Zjawisko to między innymi jest przyczyną znacznego wpływu części białkowej enzymu na jego specyficzność. Ze względu na zróżnicowaną wartość sprzężenia spinowo-orbitalnego, w różnych jonach magnetycznych należy oczekiwać zróżnicowanego wpływu części białkowej na specyficzność enzymów. Specyficzność jest funkcją wielu czynników, a wśród nich właściwości magnetycznych jonu metalicznego.

Badania wolnych rodników mają na celu określenie możliwości regulacji procesów życiowych. Analizowanie roli wolnych rodników w procesie fotosyntezy doprowadziły np. do wniosku, że intensywność tego procesu jest proporcjonalna do liczby nieskompensowanych spinów. Jednocześnie liczba nieskompensowanych spinów w świetle słonecznym jest sześciokrotnie większa niż w ciemności. Światło generuje, zatem w zielonych liściach wolne rodniki. Niemniej pewna liczba wolnych rodników istnieje również i w ciemności. Przypuszcza się, że biorą one udział w procesie utleniania [4, 103, 138, 191].

1.2.6 Kowalencyjne wiązania jonów magnetycznych w molekułach biologicznych

Wiązanie jonów magnetycznych ze swymi sąsiadami opisywane jest dokładniej przez tzw. przybliżenie wiązań kowalencyjnych. Zgodnie z tym przybliżeniem ligandy nie są już ładunkami punktowymi, lecz jonami z powłokami elektronowymi. Dopuszcza się, że powłoki elektronowe ligandów i jonów magnetycznych częściowo wzajemnie się przenikają. Przy ilościowym opisie wiązań kowalencyjnych znanych jest kilka metod rozwiązania tego zagadnienia. Jedną z bardziej rozpowszechnionych jest tzw. metoda orbitali molekularnych. Jest ona rozciągnięciem opisu elektronów w atomie na

molekułę. Przez analogię do orbitali atomowych konstruuje się orbitale molekularne obejmujące wszystkie jądra w molekule. Orbitale te noszą nazwę zdelokalizowanych. Strukturę molekuly buduje się więc analogicznie do struktury atomu. W metodzie tej przyjmuje się, że elektron znajdujący się w pobliżu któregoś z jąder podlega głównie działaniu tego jądra, natomiast oddziaływania z innymi jądrami są małe. Dlatego też orbital molekularny w pobliżu jądra będzie bliski orbitalowi atomowemu. W związku z tym przyjmuje się, że dobrym przybliżeniem orbitali molekularnych jest liniowa kombinacja orbitali atomowych [191].

1.3 Energia oddziaływań wewnątrzatomowych i międzyatomowych

Molekuła biologiczna jest obiektem złożonym z szeregu jonów. Powstawanie molekuł związane jest z oddziaływaniami między odpowiednimi elektronami i jądrami. Molekuły biologiczne są bardzo zróżnicowane i każda z nich ma swoją „specjalizację” funkcyjną.

Wszystkie prawa fizyki rządzące światem przyrody nieożywionej rozciągają się również na układy jonów i elektronów w organizmach żywych. Można przypuszczać, że zachowuje swą moc również zasada najmniejszego działania (działanie jest iloczynem energii E i czasu t : $E \cdot t$) objawiająca się podczas spełniania przez molekułę jej funkcji. Dlatego też staje się niezwykle istotne określenie energii zarówno molekuly, jak i jej składników – jonów. Zatem z punktu widzenia obserwacji zjawisk magnetycznych interesujące są energie następujących oddziaływań:

- a) oddziaływanie kulombowskie i energia kinetyczna,
- b) oddziaływania spinowo–orbitalne,
- c) oddziaływanie spinowo–spinowe,
- d) oddziaływania dipolowe,
- e) oddziaływania kwadrupolowe,
- f) oddziaływania kontaktowe,
- g) oddziaływania wymiany wewnątrzatomowej.

Znaczna liczba tych oddziaływań zdecydowanie komplikuje ich analizę, niemniej wszystkie z nich obserwowane są eksperymentalnie i służą do interpretacji anizotropii molekuł, zwrotu momentów magnetycznych, spektroskopowego współczynnika rozszczepienia i w końcowym efekcie do wyjaśnienia mechanizmu działania pola magnetycznego na cząsteczki biologiczne. Wymienione rodzaje oddziaływań pokrótce zostaną omówione poniżej [191].

a. Oddziaływania kulombowskie i energia kinetyczna.

Oddziaływania tego typu składają się z elektrostatycznego odpychania między elektronami, z analogicznego oddziaływania między jądrami atomowymi oraz z przyciągających oddziaływań między jądrami i elektronami. Energie oddziaływań tego typu noszą nazwę energii potencjalnych lub kulombowskich. Niezależnie od tego istnieją wkłady do energii wynikające z ruchu jąder oraz ruchu elektronów, noszące nazwę energii kinetycznych [53, 69, 76].

b. Oddziaływania spinowo-orbitalne.

Oddziaływanie spinowo-orbitalne jest częścią oddziaływań mikrocząsteczek (elektronów, jąder atomów), zależną od wielkości i wzajemnego ustawienia dwóch wektorów, orbitalnego i spinowego momentu pędu. W atomach oddziaływanie spinowo-orbitalne powstaje w wyniku wzajemnego oddziaływania dwóch momentów magnetycznych: momentu spinowego elektronu oraz momentu związanego z ruchem elektronu po orbicie [53, 192].

c. Oddziaływanie spinowo-spinowe.

Oddziaływanie spinowo-spinowe jest częścią oddziaływania wzajemnego mikrocząsteczek, zależą od ich momentów magnetycznych. Oddziaływanie spinowo-spinowe warunkuje zjawiska magnetyzmu i między innymi rezonansu magnetycznego. Oddziaływanie to prowadzi do zmiany rozkładu energii w obrębie układu spinowego i jest wobec tego jednym z czynników określających procesy relaksacyjne w substancjach magnetycznych [53, 192].

d. Oddziaływania dipolowe.

Magnetostatyka klasyczna definiuje dipol magnetyczny jako wielkość fizyczną o momencie magnetycznym μ wytwarzającą pole magnetyczne \mathbf{H} w odległościach dużo większych w porównaniu do swych rozmiarów. W tym jednak przypadku rozpatrywane jest oddziaływanie między momentami magnetycznymi, którym nie przypisuje się rozmiarów. Nazwa oddziaływań dipolowych pozostała ze względów tradycyjnych, a głównie ze względu na podobieństwo wzorów opisujących ten rodzaj oddziaływań. W rozwinięciu potencjały na szereg multipolowy jest to drugi człon szeregu, malejący z odległością od dipola jak $1/R^3$ [53, 69, 192].

e. Oddziaływania kwadrupolowe.

Opisywane wyżej oddziaływania spinowo-orbitalne oraz spinowo-spinowe, mają naturę magnetyczną. Oddziaływania kwadrupolowe są typu elektrostatycznego. Moment kwadrupolowy określa pole ładunków w dużej odległości (w porównaniu do wielkości ładunku), oraz energię układu w powoli

zmniejszającym się polu zewnętrznym, w przypadkach których całkowity ładunek i moment dipolowy jest równy zeru. Oddziaływanie kwadrupolowe ma istotne znaczenie przy oddziaływaniu atomów w dużych odległościach, jeżeli momenty kwadrupolowe atomów nie są równe zeru. Dla tego przypadku energia oddziaływania określona jest oddziaływaniem kwadrupolowym i maleje z odległością $1/R^5$.

Oddziaływaniami kwadrupolowymi są oddziaływania między gradientem pola elektrycznego wytwarzanego przez otoczenie jądra i momentem kwadrupolowym jądra [53, 69, 192].

f. Oddziaływania kontaktowe.

Oddziaływania spinów elektronowych ze spinami jądrowymi przyjęto nazywać oddziaływaniami kontaktowymi. Energia oddziaływań kontaktowych wiąże się bezpośrednio z niezerową polaryzacją spinową elektronów w miejscu jądra. Na stany elektronów *s* mają wpływ interesujące nas elektrony *d* oraz otaczające ligandy [53, 69, 192].

g. Energia wymiany.

Energia wymiany zależy od momentów spinowych oddziałujących atomów i ich wzajemnej orientacji. Jej efektem jest występowanie nieskompensowanych momentów magnetycznych w materiałach związane z równoległym lub antyrównoległym uporządkowaniem związane z oddziaływaniami między spinami elektronów. Natura spinów atomów jest trudna do opisu pogładowego, staje się zrozumiała na gruncie mechaniki kwantowej. Można ją traktować jako dodatkową energię kulombowskiego oddziaływania wynikającą z kwantowego charakteru fizyki atomu. Energia wymiany współzawodniczy z energią pola ligandów decydując z nią wspólnie o takim a nie innym zwrocie momentów magnetycznych w jonach.

Oprócz energii wymiany, mającą miejsce wewnątrz jonu, istnieje energia wymiany międzyatomowa. Można wysunąć przypuszczenie z dużą dozą prawdopodobieństwa, że wszystkie nośniki tlenu lub innych paramagnetycznych grup pierwiastków wiążą się z jonami magnetycznymi poprzez energię wymiany. Znane są zarówno wiązania z antyferromagnetyczną energią wymiany, tj. taką kiedy spiny jonów biorących udział w wiązaniu są antyrównoległe, jak i ferromagnetyczną energią wymiany, kiedy spiny są równoległe.

Poza wymiennym oddziaływaniem antyferromagnetycznym, może występować oddziaływanie wymienne ferromagnetyczne (dodatnie), jeśli zaistnieją odpowiednie warunki. Istnieje możliwość określenia tych warunków. Na podstawie dotychczasowych rozważań można stwierdzić, że zwroty momentów magnetycznych określają następujące trzy czynniki:

1. Wewnątrzatomowa energia wymiany $J(0)$ określająca reguły Hunda w połączeniu z zakazem Pauliego. Działa już ona w swobodnych atomach,
2. Energia pola krystalicznego współzawodnicząca z wewnątrzatomową energią wymiany dając związki z kationami magnetycznymi o wysokim i niskim spinie,
3. Międzyatomowa energia wymiany.

Te trzy energie należy jednocześnie uwzględnić przy rozpatrywaniu oddziaływań między wieloorbitalnymi i wieloelektronowymi kationami [10, 76].

1.4 Wpływ wody, poddanej obróbce polem magnetycznym, na organizmy żywe

W świetle badań nad biologicznymi efektami pola magnetycznego na poziomie molekularnym ważnym zagadnieniem jest wpływ tego pola na fizykochemiczne właściwości wody. Stwierdzono, że woda poddana działaniu pola magnetycznego posiada mniejszą twardość i daje mniejszy osad kamienia kotłowego niż woda niekondycjonowana. To odkrycie znalazło praktyczne zastosowanie przy eksploatacji kotłów parowych. W badaniach prowadzonych w ostatnich latach [28, 157, 158] stwierdzono, że i inne właściwości wody zmieniają się pod wpływem pola magnetycznego. Badania wykazały [28, 150, 157, 158], że uzyskane efekty (obniżenie twardości wody i ilości osadu) osiągają maksimum przy dwóch optymalnych natężeniach pola – około $1,2 \cdot 10^5$ i $3,6 \cdot 10^5$ A/m. Obniżenie ilości osadu zależy także od szybkości przepływu wody w polu magnetycznym, osiąga maksimum w zakresie szybkości 0,4 – 0,5 m/s; przy mniejszych i większych szybkościach efekt jest słabszy.

Wyniki analizy krystalochemicznej pokazały, że osad w wodzie poddanej działaniu pola magnetycznego składa się z kryształów romboedrycznych i innych form, podczas gdy normalnie przeważa iglasta forma kryształów. Ważną składową częścią osadu jest węglan wapniowy, wydzielający się zwykle w formie kalcytu – trwałej krystalicznej modyfikacji. W wodzie poddanej działaniu pola magnetycznego stwierdzono pewną liczbę nietrwałej modyfikacji – aragonitu. Obserwuje się wzrost liczby krystalicznych cząstek CaCO_3 , co powoduje redukcję nasycenia naturalnej wody przez CaCO_3 , zmianę równowagi kwasu węglowego i zwiększenie zawartości CO_2 w wodzie [45, 181].

Oddziaływanie zewnętrznego pola magnetycznego może wpływać na prędkość i kierunek przemieszczania się spolaryzowanych cząstek substancji, co w konsekwencji może decydować o tempie wielu procesów życiowych zachodzących w roślinach. Przeprowadzone badania z wykorzystaniem wody magnetyzowanej potwierdzają słuszność stosowania jej w uprawach. Z przeprowadzonych badań [150] wynika, że woda magnetyzowana pozytywnie wpłynęła na wzrost i plonowanie pomidora.

Zaobserwowano zdecydowanie większy plon o znacznie wyższej jakości na obiektach podlewanych wodą poddaną działaniu pola magnetycznego w porównaniu z kontrolą. W przypadku łubinu żółtego, lucerny siewnej odpowiednio o 4% i 2% była wyższa szybkość kiełkowania na obiektach z wodą magnetyzowaną [11, 54]. Podobna reakcja wystąpiła u gorzycy białej i roszponki warzywnej, na obiektach z wodą magnetyzowaną szybkość kiełkowania była wyższa odpowiednio o 8% i 15% w porównaniu z kontrolą [147]. Podlewanie upraw wodą magnetyzowaną obserwowano w Arabii Saudyjskiej, badany jęczmień dał większe plony niż kontrola [68]. Pozytywny wpływ podlewania roślin wodą poddaną obróbce magnetycznej stwierdzono dla zielonego groszku i selera, warzywa były podlewane wodą z wodociągu, wodą oczyszczoną ze ścieków oraz wodą słoną z różnymi stopniami zasolenia. Dla każdego rodzaju wody, badania przyniosły lepszy skutek w postaci większych plonów niż próba kontrolna podlewana zwykłą wodą wodociągową [23]. Wodą poddaną obróbce magnetycznej podlewano również ziarniaki pszenicy, jęczmienia, słonecznika, kukurydzy, ryżu, soi i sałaty. Wyniki pokazały, że takie nasiona lepiej wchłaniały wodę co przyspieszyło ich wzrost [3, 5, 6, 28, 150, 157, 158].

1.5 Wpływ pola magnetycznego Ziemi na organizmy żywe, magnetotropizm

Jak wykazało wielu badaczy, wzrost roślin i ich orientacja przestrzenna zależy także od pola geomagnetycznego. Istnieje wiele prac odnoszących się do wpływu pola magnetycznego ziemi na orientację kierunkową organizmów. Autorzy prac [150, 194, 196, 201] opisali reakcje organizmów żywych na naturalne i zmienne kierunki sił pola magnetycznego. W jednym typie doświadczeń zaobserwowano naturalną orientację roślin i zwierząt na powierzchni ziemi, w wodzie i w powietrzu. W innych doświadczeniach umieszczano dany organizm w określonym kierunku i badano zmianę jego położenia [194].

Obserwacje reakcji roślin na pole magnetyczne ziemi i sztuczne pola magnetyczne, doprowadziły do odkrycia magnetotropizmu. Okazało się, że w warunkach naturalnych kierunek wzrostu różnych części roślin, szczególnie korzeni, nie jest przypadkowy. Korzenie zwracają się najczęściej w kierunku południowego bieguna magnetycznego, który też pobudza wzrost korzeni [196, 201].

Doświadczenia prowadzone na roślinach uprawnych wykazały, że korzenie boczne wielu roślin rosną najczęściej w kierunku wschód – zachód. Skierowywanie kiełkujących nasion w stronę południowego bieguna magnetycznego – wywoływało zmianę kierunku i tempa wzrostu korzeni. Zjawisko magnetotropizmu potwierdziły doświadczenia ze sztucznymi polami magnetycznymi [150].

Po stwierdzeniu istnienia magnetotropizmu, przeprowadzono szereg badań nad wpływem kierunku ułożenia zarodków nasion na późniejsze cechy roślin. Okazało się, że nie zawsze nasiona zwrócone zarodkami ku biegunowi magnetycznemu

południowemu mają wyższy procent kiełkowania i lepiej rosną, gdyż reakcja na położenie nasienia w stosunku do biegunów zależy od typu symetrii. Jedne nasiona dawały lepsze plony w wypadku ułożenia w kierunku południowego bieguna magnetycznego (większa aktywność enzymatyczna, lepsze oddychanie, więcej chlorofilu), inne lepiej rozwijały się gdy były skierowane zarodkami ku północnemu biegunowi magnetycznemu [194].

Orientację geomagnetyczną badano na różnych obiektach biologicznych i stwierdzono jej istnienie zarówno w poszczególnych cząstkach związków organicznych, jak i w całych organizmach, nie wyłączając człowieka. Zrozumienie wiodącej roli pola magnetycznego ziemi w ewolucji tłumaczy wiele zagadnień biologicznych: masowe mutacje, pojawianie się nowych gatunków i rodzajów przy nagłych zmianach pola magnetycznego ziemi, a także procesy mikroewolucji zachodzące współcześnie, jak pojawianie się nowych wirusów i bakterii, czy synchroniczne pojawianie się mutacji w określonych latach u różnych roślin. U podstaw wszystkich wymienionych procesów leżą zmiany molekularne i submolekularne w aparacie genetycznym żywych organizmów pod wpływem pola magnetycznego ziemi [201].

W doświadczeniach obserwowano wpływ anomalii magnetycznych pochodzenia przemysłowego, jak również naturalnych anomalii magnetycznych, np. w rejonie Kurska – występowało wtedy większe rozproszenie kierunków korzeni. Wykazano, że w innych częściach roślin, gałęziach drzew, liściach i kwiatach, także występują pewne preferencje kierunkowe, np. kwiaty słonecznika, już w stadium pąka, są zwrócone w określonym kierunku (na południowy-zachód, południe lub południowy-wschód), a liście ziemniaków – głównie na południowy-wschód.

Orientacja kierunkowa całego organizmu roślinnego lub jego części wpływa także na różnice czynnościowe i fizykochemiczne. Różne położenie zarodka w stosunku do biegunów może prowadzić do większego wzrostu części nadziemnej rośliny w stosunku do podziemnej. Zwrot zarodka ku południowi daje większy wzrost części nadziemnej [71, 150].

Rozdział 2

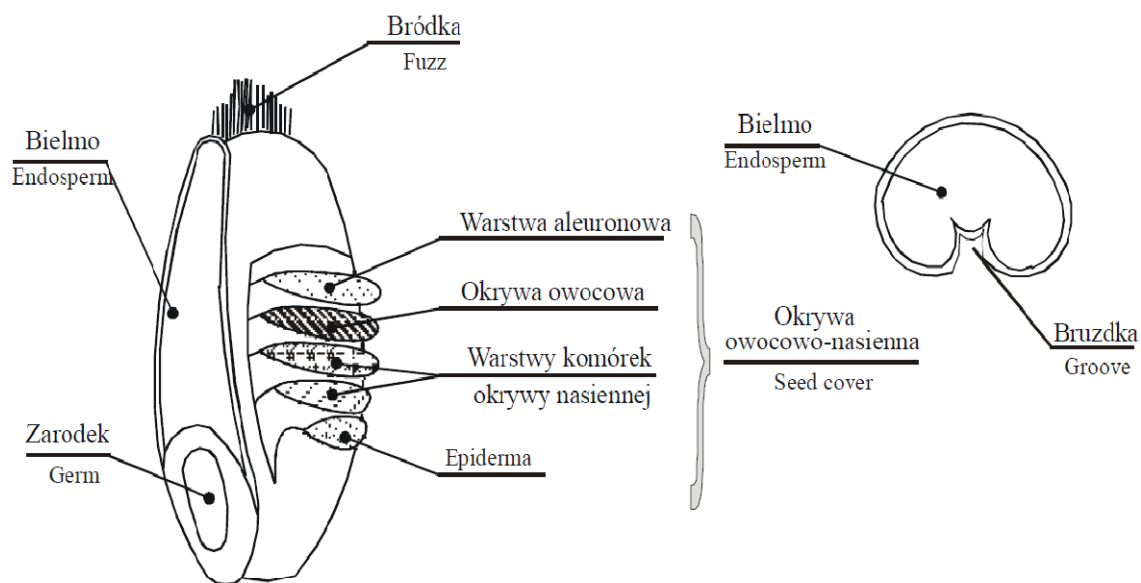
Struktura ziarniaków i nasion

2.1 Ziarniak pszenicy i nasiona lnianki jako wielowarstwowa sferoida spłaszczona

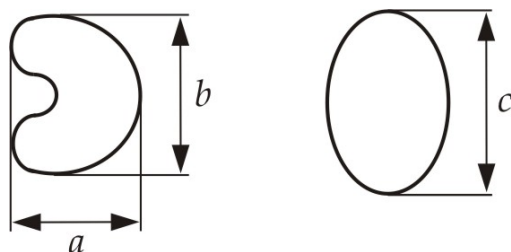
Owocem zboża jest ziarniak. Posiada on strukturę warstwową, a kolejne warstwy to:

- zarodek,
- warstwa endospermy (bielmo),
- warstwa endospermy (aleuron),
- warstwa okrywy owocowo–nasionnej.

Okrywa owocowo–nasionna jest strukturą wielowarstwową i składa się z epidermy, warstwy komórek okrywy nasiennej i okrywy owocowej. Warstwa komórkowa "aleuron" jest zewnętrzną częścią endospermy, składa się z komórek zawierających rezerwy białka w formie ziaren "aleuron". Ich ściany są grube i zbudowane z celulozy. Endosperma wypełnia wnętrze ziaren i stanowi 70 % – 80 % masy owoców. Komórki endospermy są wypełnione rezerwami polisacharydy (wielocukrem) w formie pojedynczych koncentrycznych ziaren skrobi. W centralnej części, gdzie znajdują się większość ziaren skrobi, jądra komórek endospermy są ściśnięte, zdeformowane i martwe [130–135]. Strukturę ziarniaka przedstawiono na rysunku 2.1 [59], natomiast przybliżony kształt ziarniaków pszenicy na rysunku 2.2 [63].



Rys. 2.1. Budowa ziarna pszenicy [59]



Rys. 2.2. Rzuty i podstawowe wymiary ziarniaków: a – grubość, b – szerokość, c – długość [63]

Gabaryty nasion różnią się od siebie w zależności od warunków pogodowych w danym roku, warunków glebowych, gatunku zboża i zawierają się w przedziałach: grubość a {2,26 – 3,09 mm}, szerokość b {2,59 – 3,65 mm}, długość c {5,72 – 6,60 mm} [63].

Z punktu widzenia właściwości fizycznych ziarniak jest paramagnetykiem o niejednorodnej budowie, zatem umieszczenie go w jednorodnym zewnętrznym polu magnetycznym powoduje zniekształcenie rozkładu pola. Wartości parametrów magnetycznych poszczególnych ziarniaków mogą być różne i zależne od wielu czynników. Do najważniejszych z nich zalicza się: wilgotność, budowę wewnętrzną, temperaturę. Stopień zniekształcenia pola zależy natomiast od właściwości magnetycznych warstw ziarniaka.

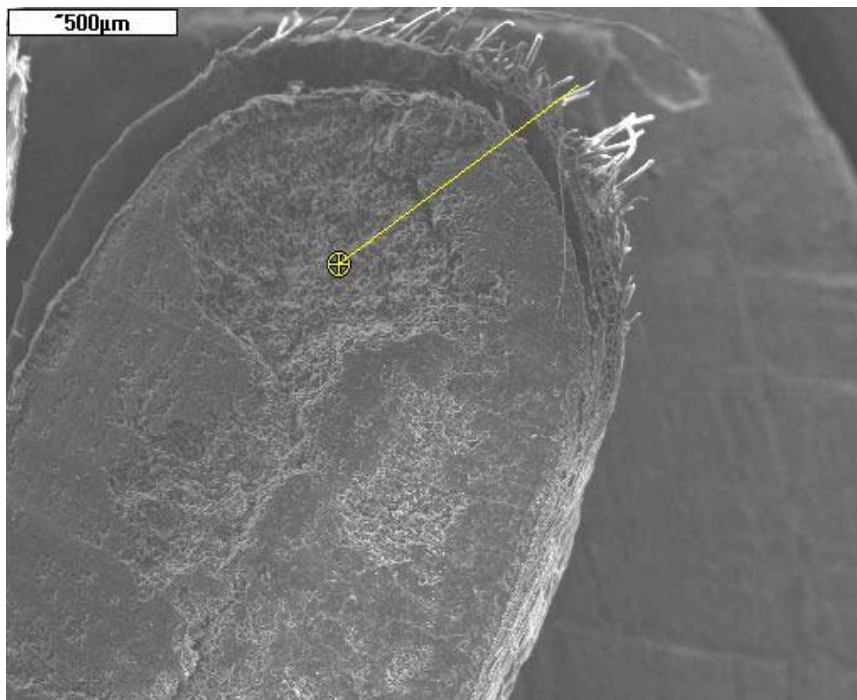
Analityczne określenie rozkładu pola magnetycznego i efektów jego oddziaływania na ziarniaka z uwzględnieniem wszystkich czynników jest praktycznie niemożliwe. Związane jest to bardzo dużą trudnością odwzorowania w modelu złożonej struktury i wszystkich właściwości [14].

2.2 Badania ziarniaka pszenicy mikroskopem skaningowym

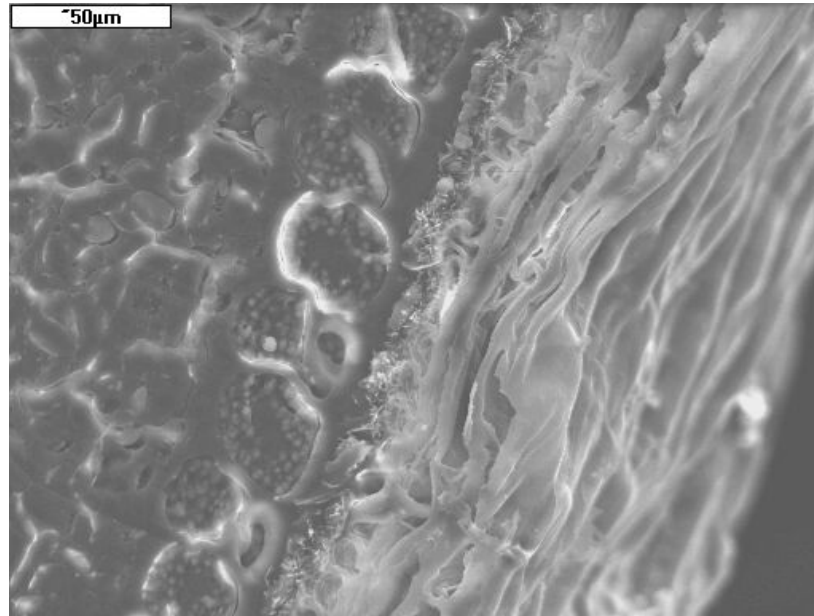
Ostatnie lata przyniosły dynamiczny rozwój technik i metod badań struktury ziaren zboża i ich właściwości. Metody te wykorzystują między innymi: wiązki laserowe, ultradźwięki, promieniowanie podczerwone i promieniowanie X. Większość aplikacji dotyczy badań właściwości mechanicznych, chemicznych i biologicznych właściwości [87, 88]. Celem zatem jest poznanie struktury takich ziarniaków. Badania mikroskopem skaningowym dają wiele informacji o wewnętrznej strukturze ziarniaka. Badania mikroskopii skaningowej ziarniaków pszenicy zostały przeprowadzone w Katedrze Technologii Ceramiki i Materiałów Ogniotrwałych AGH. Do badań użyto mikroskopu skaningowego JEOL (model 5400), współpracującego ze spektrometrem promieniowania rentgenowskiego z dyspersją energii firmy Oxford Instrument LINK ISIS. Mikroskop ten posłużył do zaobserwowania kształtu ziarniaków pszenicy i lnianki, a także do oszacowania składu pierwiastkowego. Badania obejmowały analizę punktową składu pierwiastkowego, mikroanalizę wzdłuż linii, oraz rozkład powierzchniowy pierwiastków [87]. Przygotowanie próbek do badań obejmowało przecięcie każdej z nich skalpelem wzdłuż dłuższej osi.

Na rysunku 2.3 przedstawiono obrazy mikrostruktury powierzchni (Scanning Electron Microscopy SEM) wraz z mikroanalizą wzdłuż zaznaczonej linii.

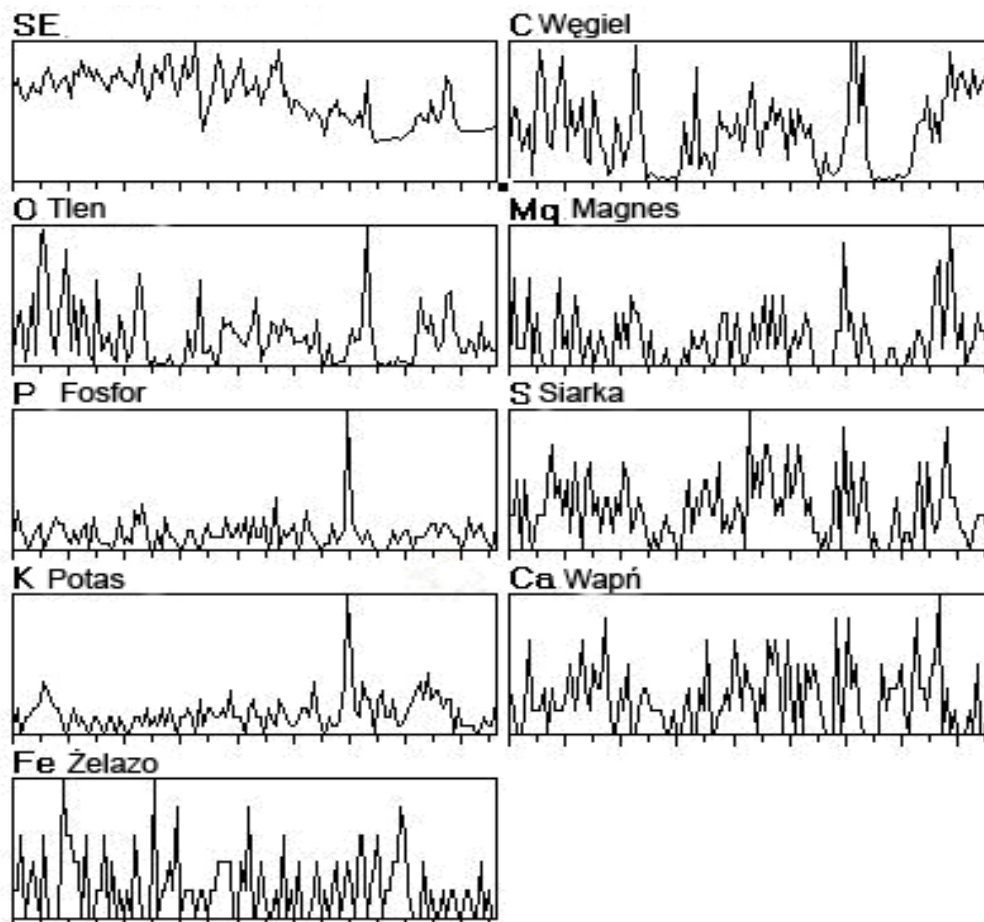
a)



b)



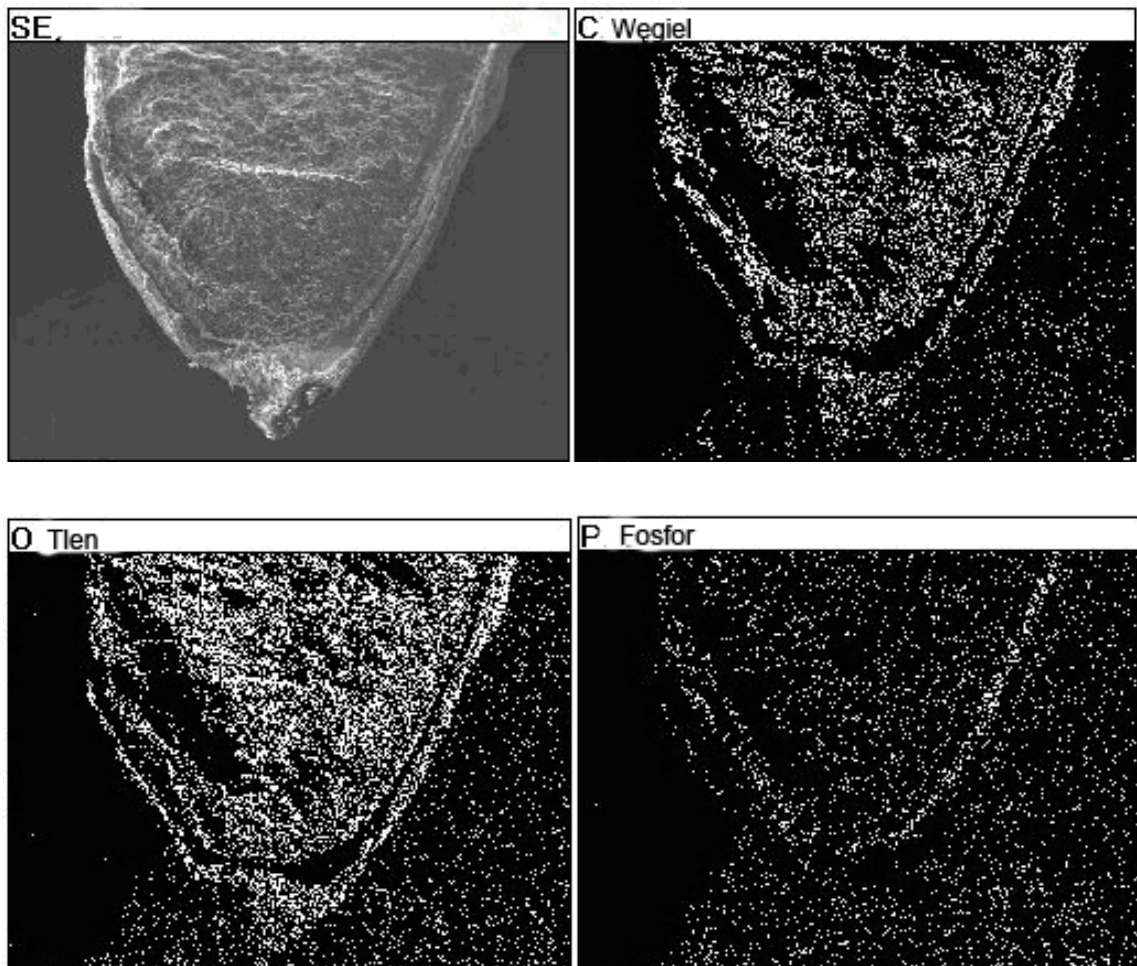
c)

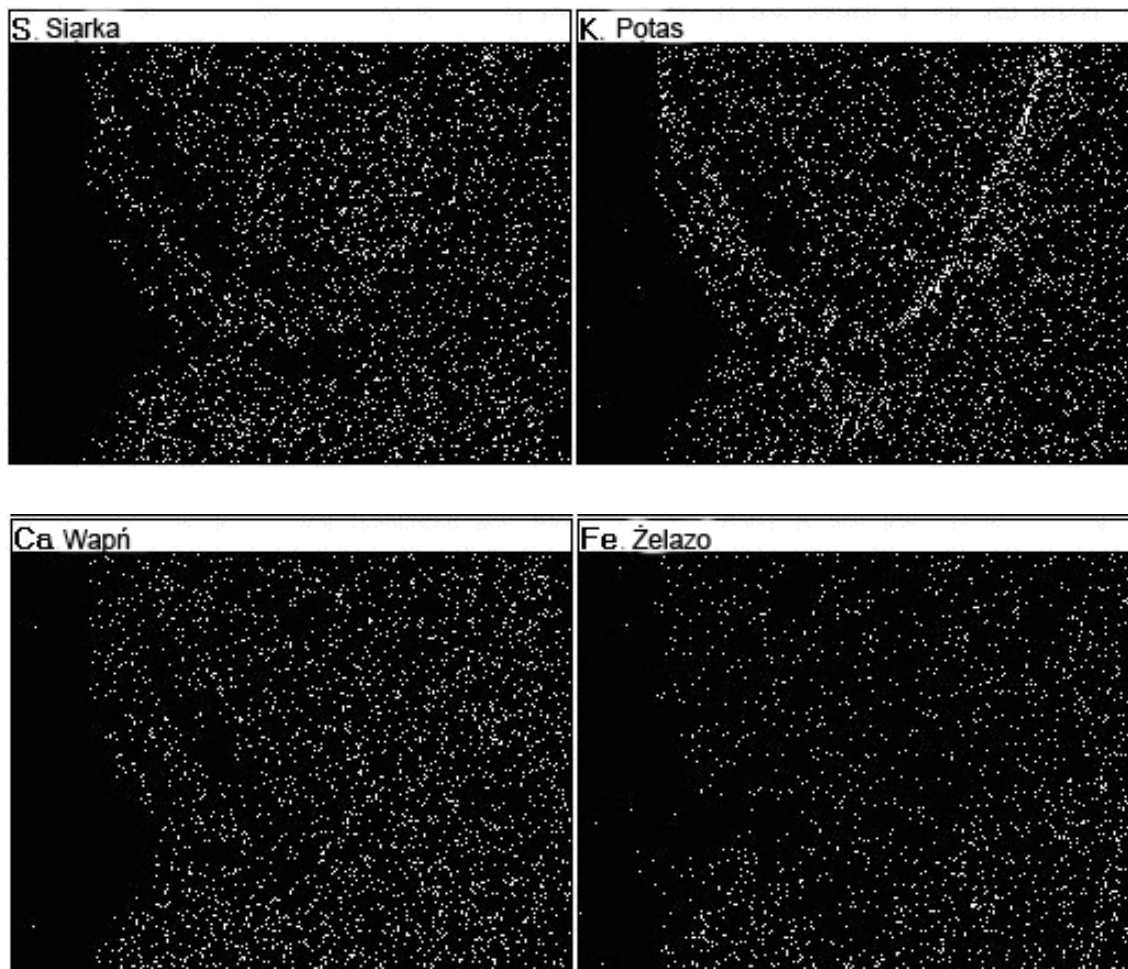


Rys. 2.3. Obraz mikrostruktury powierzchni (SEM) fragmentu przekroju ziarniaka pszenicy: a) powiększenie 50x, b) powiększeniu 500x, c) mikroanaliza składu pierwiastkowego wzdłuż zaznaczonej linii na rys. 2.3a

Mikrostruktura ziarniaka, przedstawiona na rysunku 2.3a, w powiększeniu pięćdziesięciokrotnym wykazuje budowę warstwową, przy czym warstwą o największej grubości jest warstwa endospermy wypełniona skrobią. Natomiast na rysunku 2.3b przedstawiono wybrany mikroobszar przy powiększeniu 500 x, który potwierdza warstwową budowę ziarniaka i obejmuje warstwę pokrycia nasiennego wraz z warstwą endospermy. Wykonana mikroanaliza wzdłuż zaznaczonej linii na rysunku 2.3a wykazała zawartość węgla, tlenu, magnezu, fosforu, siarki, potasu, wapnia i żelaza. Udział pierwiastków nie wykazuje większych zmian w badanym zakresie, jedynie w obszarze endospermy (aleuron) i pokrycia nasiennego można zaobserwować wzrost zawartości fosforu, potasu, magnezu i wapnia.

Na rysunku 2.4 przedstawiono rozkład powierzchniowy pierwiastków badanego fragmentu powierzchni ziarniaka pszenicy.

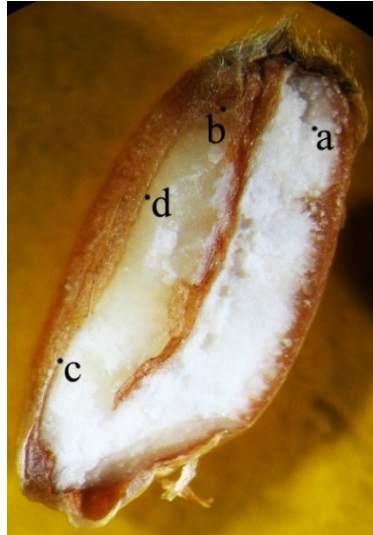




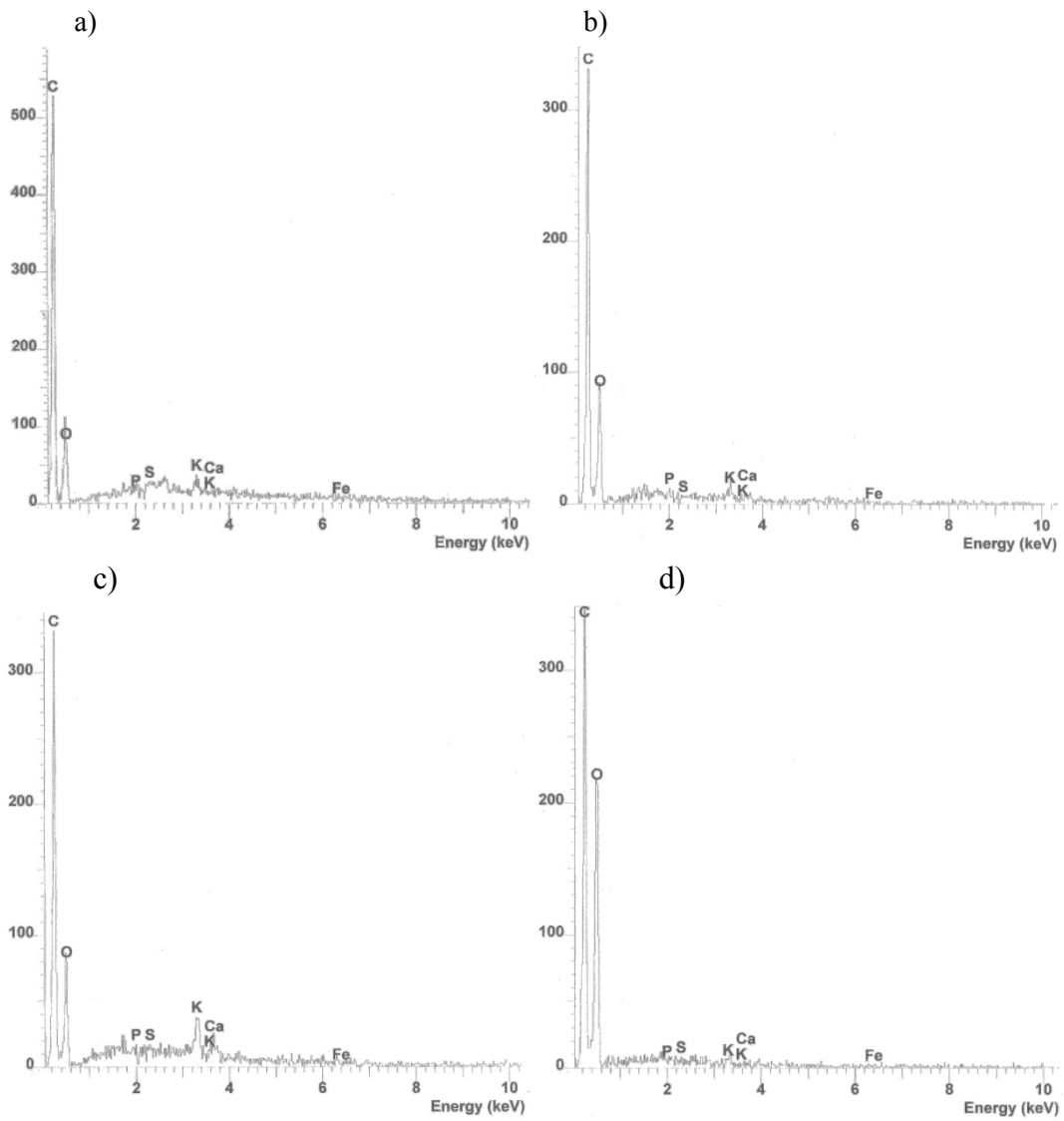
Rys. 2.4. Mapa rozkładu pierwiastków na fragmencie powierzchni ziarniaka pszenicy

Jest to fragment ziarniaka z rysunku 2.3. Obrazy SEM obejmują udział węgla, tlenu, fosforu, siarki, potasu, wapnia i żelaza. Największy udział wykazuje węgiel i tlen, natomiast pozostałe z wymienionych pierwiastków cechuje mniejszy ale równomierny rozkład. Można jednak zauważyć, że pierwiastki fosforu i potasu koncentrują się w okolicach zewnętrznych warstw aleuronowej oraz pokrycia nasiennego.

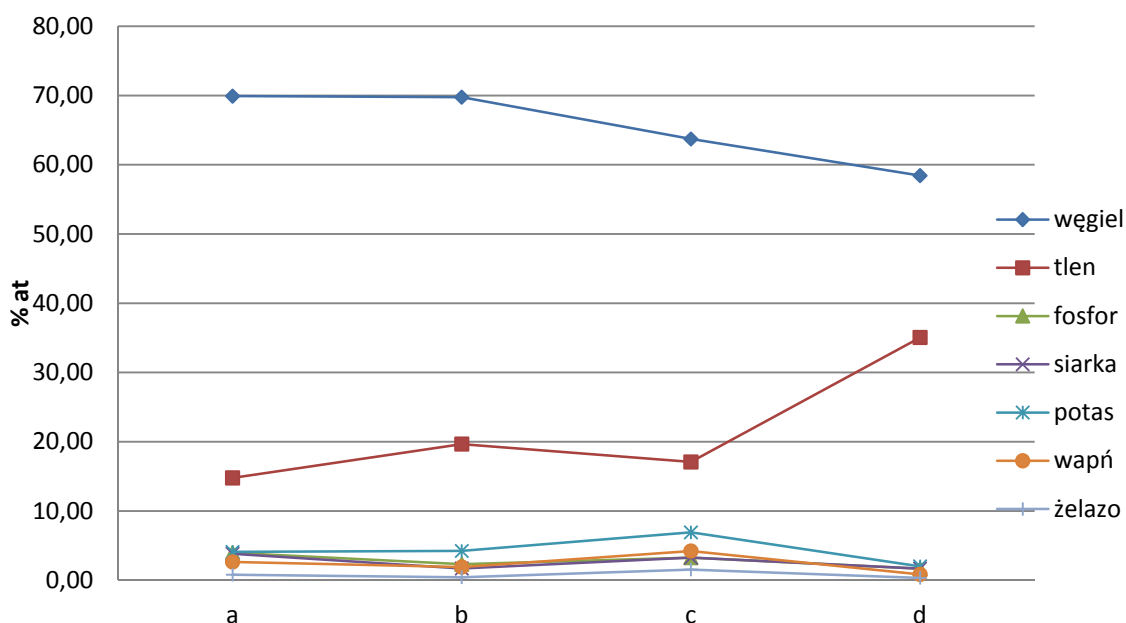
Na rysunku 2.5 przedstawiono zdjęcie przekroju ziarniaka pszenicy wraz z zaznaczonymi punktami w których przeprowadzono analizę punktową składu chemicznego pokazaną na rysunku 2.6. Otrzymane wyniki zestawiono na rysunku 2.7, wykonana analiza wskazuje na jednorodność składu chemicznego w badanych mikroobszarach. Niewielkie odchylenie jest dla punktu pomiarowego c, gdzie ilość potasu i wapnia jest nieco większa niż w pozostałych punktach pomiarowych.



Rys. 2.5. Przekrój ziarniaka pszenicy z zaznaczonymi punktami dla których badano skład chemiczny



Rys. 2.6. Analiza punktowa składu chemicznego na powierzchni przekroju ziarniaka pszenicy w punktach zaznaczonych na rys. 2.5



Rys. 2.7. Procentowy udział pierwiastków (% at) w badanych punktach ziarniaka pszenicy

Analizując otrzymane wyniki badania ziarniaków pszenicy mikroskopem skaningowym stwierdzono że:

- kształt ziarniaka jest zbliżony do elipsoidy lub sferoidy,
- ziarniak pszenicy ma strukturę warstwową,
- warstwy mają różne wielkości, największą z nich jest warstwa endospermy której komórki zawierają skrobię,
- rozkład badanych pierwiastków jest wewnątrz ziarniaka równomierny.

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

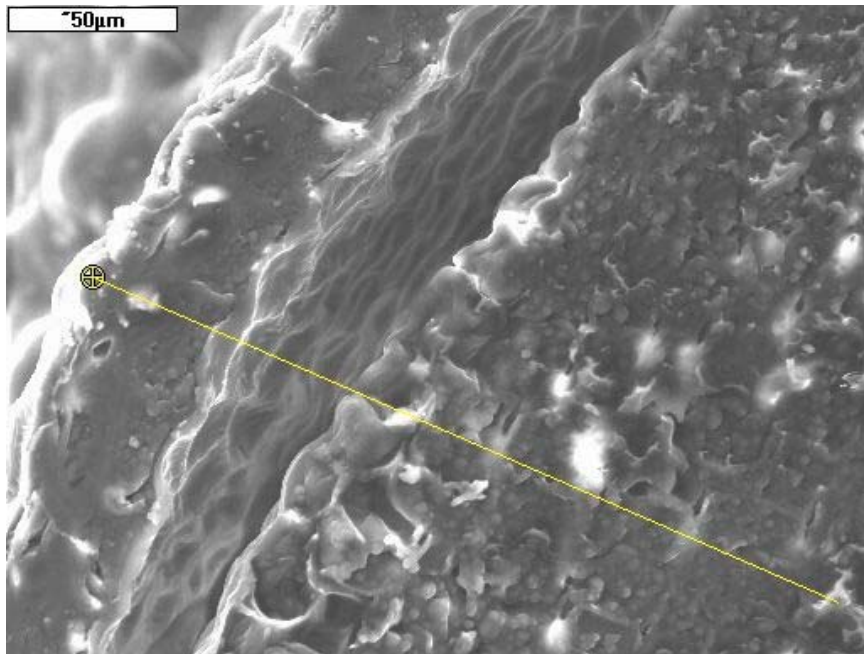
2.3 Badania nasion lnianki mikroskopem skaningowym

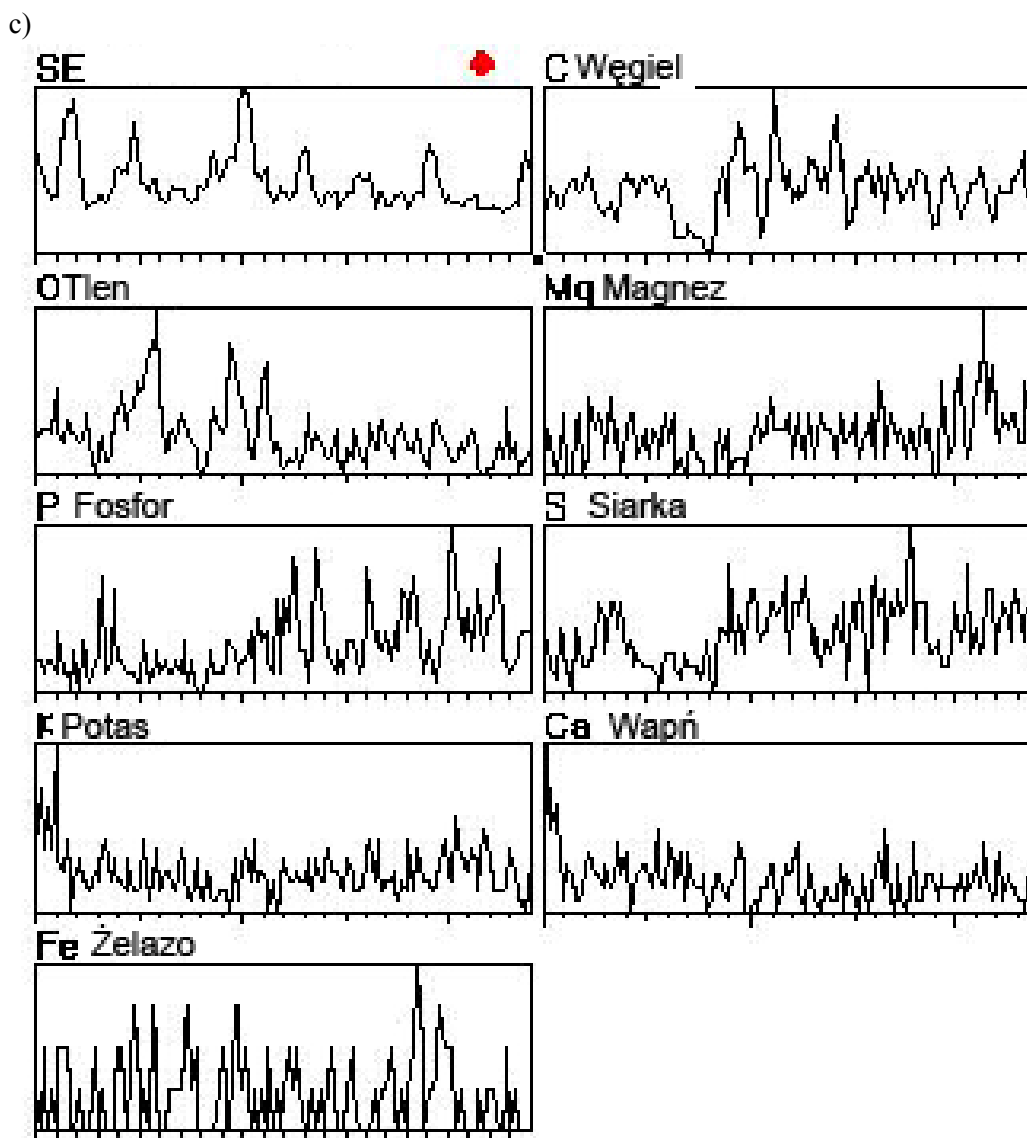
Analogiczne badania mikroskopii skaningowej, jak dla ziarniaków pszenicy, przeprowadzono dla nasion lnianki. Badania poprzedziło przecięcie skalpelem nasiona lnianki wzdłuż dłuższej oraz krótszej osi. Na rysunku 2.8a przedstawiono obrazy SEM powierzchni przekrojów nasion lnianki w powiększeniu 50x. Rysunek 2.8b przedstawia obrazy SEM powierzchni przekrojów nasion lnianki w powiększeniu 500x, wraz z mikroanalizą wzdłuż zaznaczonej linii z rysunku 2.8c.

a)



b)

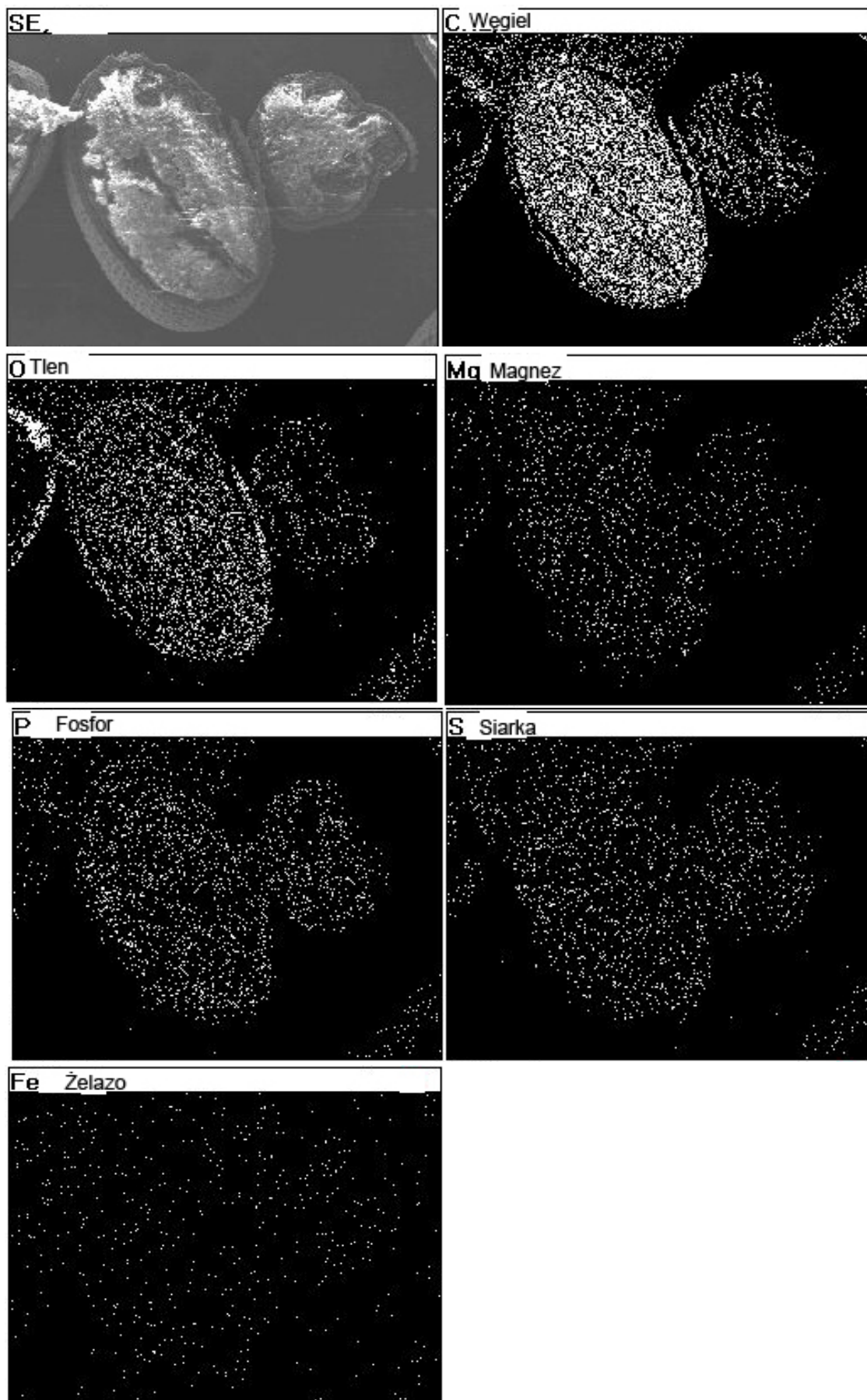




Rys. 2.8. Zdjęcia przekrojów nasion lnianki a) obraz SEM - powiększenie 50x, b) obraz SEM - powiększenie 500x, c) mikroanaliza składu pierwiastkowego wzdłuż zaznaczonej linii na rys. 2.8b

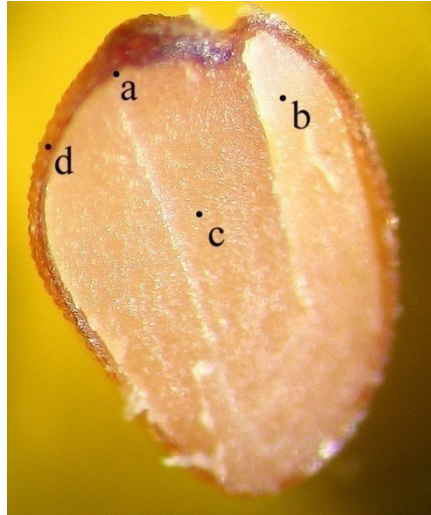
Badania obejmowały nasiona, które zostały przecięte wzdłuż dłuższej i krótszej osi. Obrazy SEM przedstawione na rysunku 2.8 a i b potwierdzają warstwową strukturę nasiona, natomiast mikroanalizę składu pierwiastkowego wzdłuż zaznaczonej linii na rysunku 2.8c. Obecność tlenu, magnezu, fosforu, siarki, potasu, wapnia i żelaza nie wykazuje większych zmian zawartości w badanym zakresie.

Na rysunku 2.9 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.

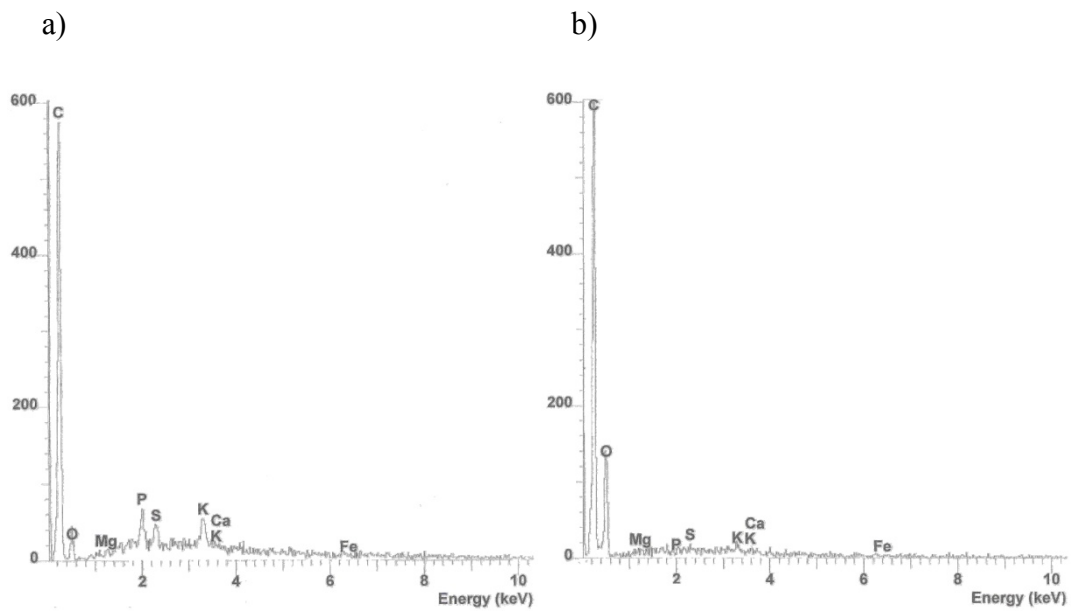


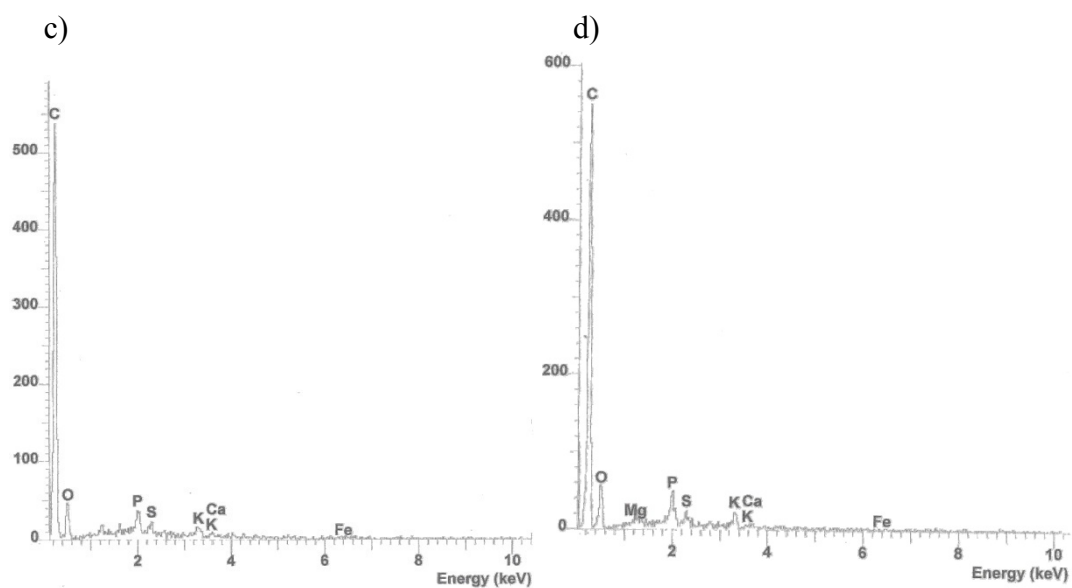
Rys. 2.9. Mapa rozkładu pierwiastków na powierzchni przekrojów nasion lnianki

Na rysunku 2.10 przedstawiono zdjęcie przekroju nasiona lnianki z zaznaczeniem punktów, w których dokonano analizy punktowej składu pierwiastkowego przedstawione go na rysunku 2.11.

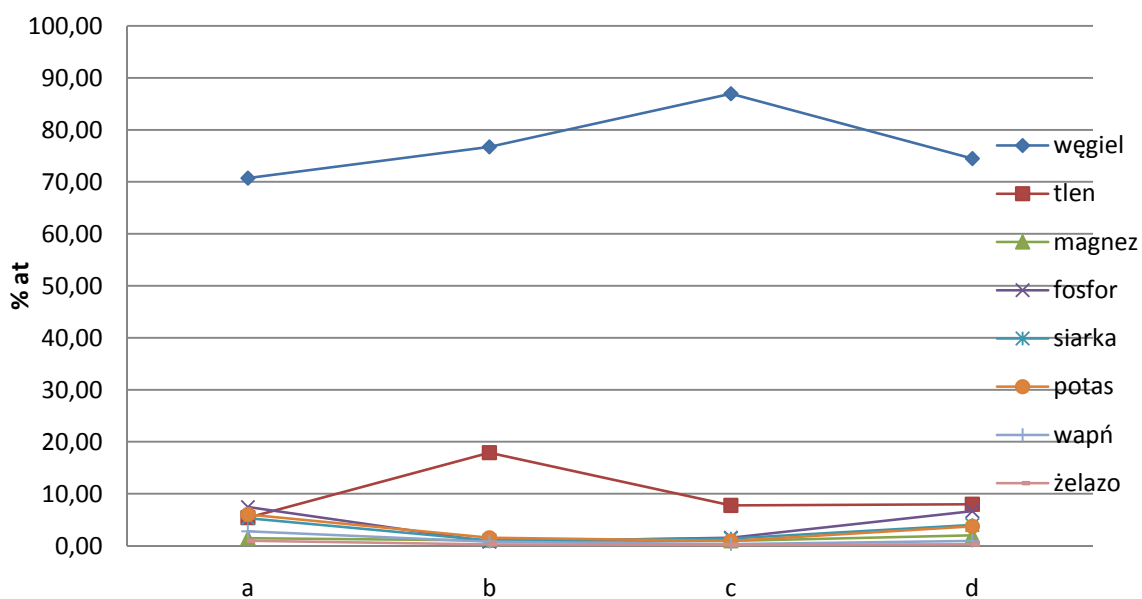


Rys. 2.10. Przekrój nasiona lnianki z zaznaczonymi punktami analizy EDS





Rys. 2.11. Analiza punktowa składu chemicznego na powierzchni przekroju nasiona lniarki w punktach zaznaczonych na rys. 2.10



Rys. 2.12. Procentowy rozkład pierwiastków (%at) w badanych punktach nasiona lniarki

Rezultaty badań zawartości poszczególnych pierwiastków w badanych punktach zestawiono na rysunku 2.12. Z przeprowadzonych badań wynika, że rozkład pierwiastków na powierzchni przekrojów nasion lniarki jest równomierny, nie zaobserwowano znaczących różnic w występowaniu pierwiastków w badanych obszarach.

Na podstawie analizy otrzymanych wyników badania nasion lnianki mikroskopem skaningowym można stwierdzić że:

- kształt nasiona jest zbliżony do elipsoidy lub sferoidy,
- nasiono lnianki ma strukturę warstwową, o różnej grubości,
- rozkład badanych pierwiastków jest równomierny.

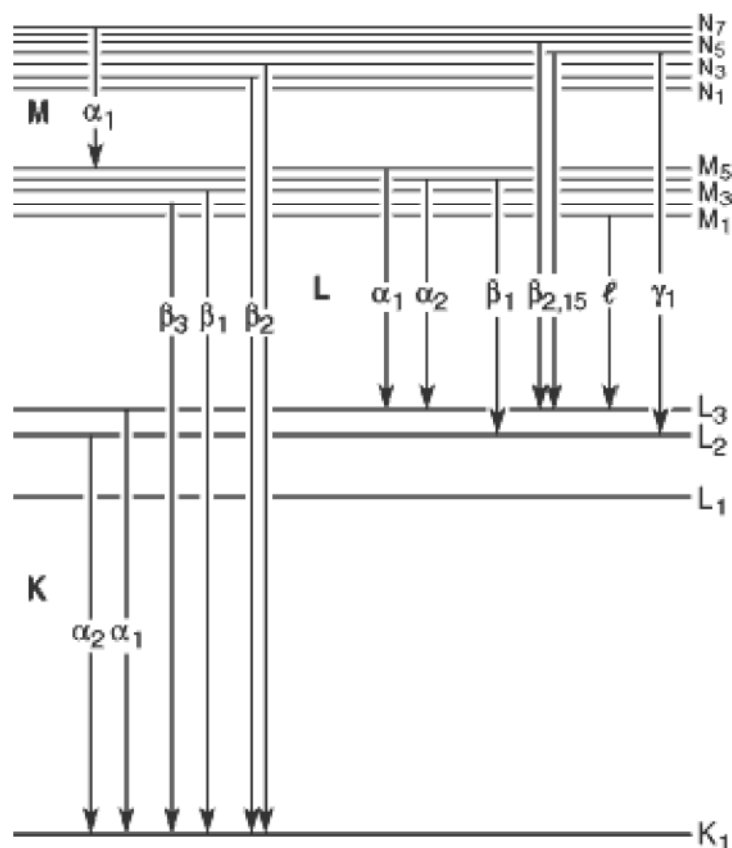
Powyższe wnioski pozwalają stwierdzić, że dla celów modelowania oddziaływania pola magnetycznego na nasiona lnianki, podobnie jak ziarniaki pszenicy, badane ziarna można przedstawić jako jednowarstwową sferoidę spłaszczoną, która ma właściwości paramagnetyczne.

2.4 Badanie stężenia pierwiastków w ziarniaku pszenicy

Celem badań było wyznaczenie stężenia pierwiastków w ziarniaku pszenicy, a w szczególności oznaczenie ilości pierwiastków mających wpływ na właściwości magnetyczne ziarniaka. Badania przeprowadzono metodą fluorescencji rentgenowskiej w Katedrze Fizyki Medycznej i Biofizyki na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH.

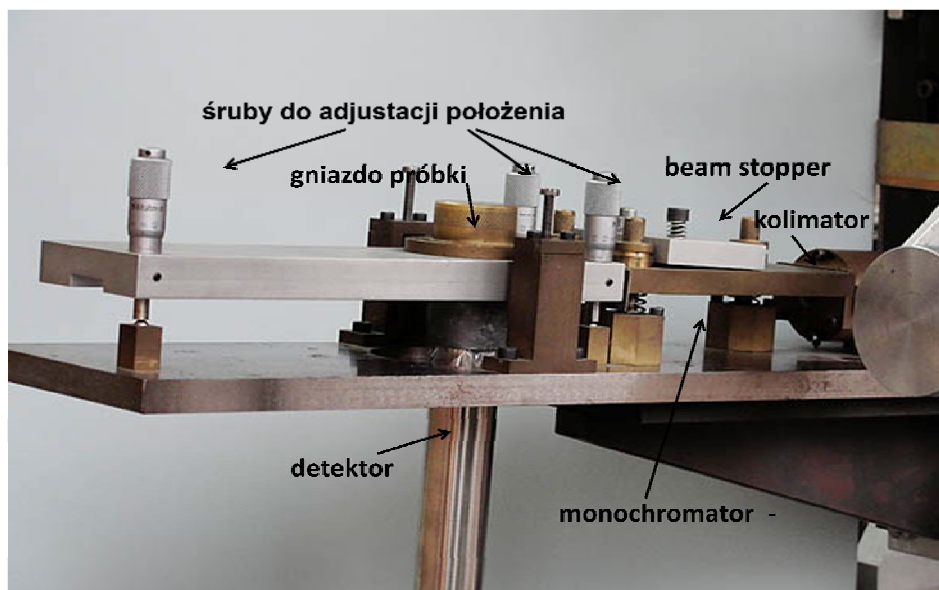
2.4.1 Podstawy metody analizy fluoroscencyjnej

Pod wpływem naświetlania próbki promieniowaniem rentgenowskim może dochodzić do wybicia elektronów znajdujących się na wewnętrznych powłokach elektronowych atomów. Powstałe „dziury” elektronowe są zapelniane przez elektrony z wyższych powłok, a towarzyszy temu emisja energii w postaci kwantu promieniowania X charakterystycznego dla danego pierwiastka (rys. 2.13). Linie emisyjne obserwuje się w detektorze, a następnie na podstawie wysokości piku dla określonej wartości energii, oznacza się ilość danego pierwiastka.



Rys. 2.13. Przejścia elektronów, spowodowane wpływem promieniowania rentgenowskiego, powodujące różne linie emisyjne [186]

W technice całkowitego odbicia promieniowania rentgenowskiego (Total Reflection X-Ray Fluorescence – TXRF), wiązka promieniowania rentgenowskiego wychodząca z lampy rentgenowskiej przez kolimator szczelinowy przechodzi przez monochromator, pada na próbkę naniesioną na powierzchnię reflektora [77, 114]. Promieniowanie padając na próbkę pod kątem mniejszym od krytycznego ulega całkowitemu odbiciu. Oznacza to, że zarówno kwanty promieniowania wzbudzającego, jak i emitowanej fluorescencji nie są tracone na absorpcję w reflektorze i dzięki temu czułość analizy jest znacznie podwyższona. Na rysunku 2.14 przedstawiono budowę modułu do TXRF, na którym wykonano badania, których wyniki przedstawiono w niniejszej pracy.



Rys. 2.14. Moduł TXRF zamontowany w spektrometrze Katedry Fizyki Medycznej i Biofizyki [114]

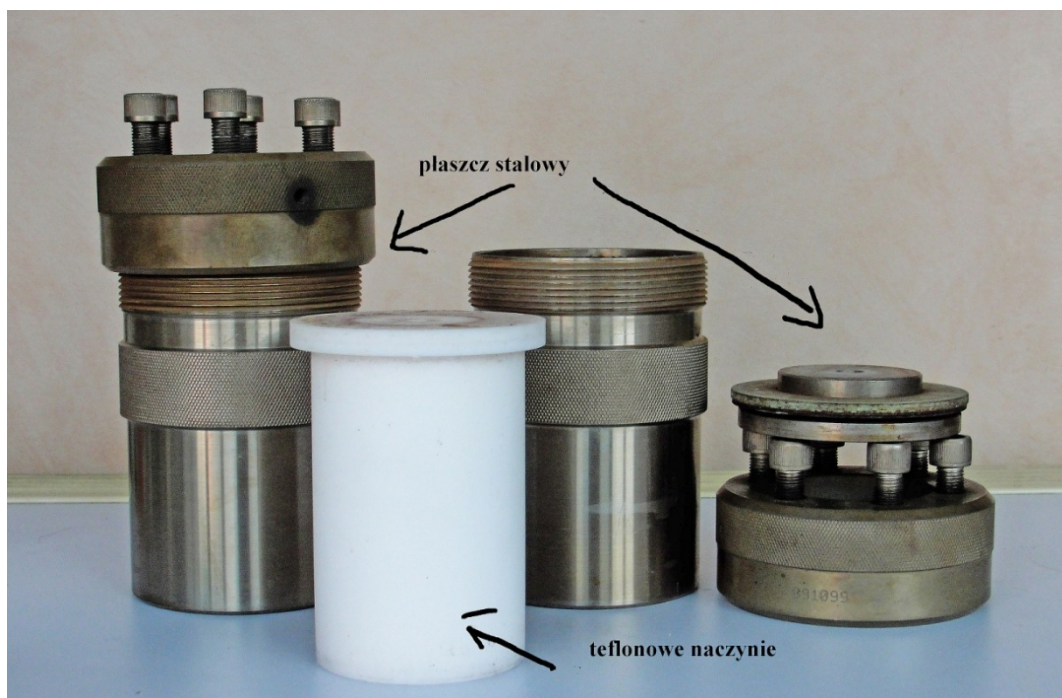
2.4.2 Aparatura do analizy fluoroscencyjnej

Badania przeprowadzone na spektrometrze zaprojektowanym i skonstruowanym w Zakładzie Analiz Radiometrycznych. Spektrometr składa się z lampy rentgenowskiej (typu long fine focus) z anodą molibdenową i przystawki do pomiaru w geometrii całkowitego odbicia zaprojektowanej i skonstruowanej w Instytucie Atomowym w Wiedniu [67].

Do pomiarów używana jest lampa z anodą molibdenową. Energia promieniowania charakterystycznego serii K Mo wynosi 17,44 keV, co umożliwia poprawną analizę pierwiastków o liczbach atomowych Z powyżej 19 – cięższych od potasu. Promieniowanie pierwiastków lżejszych od potasu jest silnie absorbowane w powietrzu [89].

Oznaczenia ilościowe wykonywane są z zastosowaniem standardu wewnętrznego, to jest na dodaniu znanej ilości pierwiastka nie występującego w badanej próbce. Standardem wewnętrznym może być dowolny pierwiastek nie występujący w badanej próbce, tak dobrany, aby w miarę możliwości uniknąć nakładania się jego linii spektralnych z liniami pierwiastków analizowanych [89].

Zazwyczaj wybierane są pierwiastki emitujące promieniowanie linii K w zakresie badanych energii.



Rys. 2.15. Bomby mineralizacyjne. Próbkę umieszczoną w naczyniu teflonowym umieszcza się w stalowym płaszczu [114]

2.4.3 Wyniki pomiarów

Zbadano trzy próbki pszenicy w postaci trzech pojedynczych ziaren, przed pomiarem zostały one poddane mineralizacji. Mineralizacja polega na rozтворzeniu próbki w utleniającym kwasie, w wysokiej temperaturze. W procesie mineralizacji organiczna matryca próbki (azot, węgiel, fosfor, siarka, chlor, brom) jest utleniana i w postaci mieszaniny lotnych tlenków zostaje usunięta z roztworu. Próbki były roztwarzane w kwasie azotowym V. Temperatura mineralizacji wyniosła 200°C. Metoda ta pozwala na rozłożenie wiązań chemicznych w większości substancji poddawanych analizie. Usunięcie organicznej matrycy próbki przyczynia się do zmniejszenia tła pochodzącego od promieniowania rozproszonego i w konsekwencji do zwiększenia czułości metody.

Ciekła próbka została nakropiona na bardzo gładką powierzchnię podkładki zwanej reflektorem. Reflektor ma kształt krążka o średnicy ok. 30mm. Najczęściej reflektory wykonane są z czystego dwutlenku krzemu (sinsil), polerowanego proszkiem diamentowym. Przed użyciem powinna zostać sprawdzona czystość reflektora. Powierzchnia reflektora powinna być idealnie gładka, tak, aby promieniowanie rentgenowskie nie ulegało rozproszeniu na nierównościach powierzchni. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. 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.

Rozdział 3

Badanie rozkładu i stopnia utlenienia żelaza w ziarniakach pszenicy i nasionach lnianki oraz magnetyzmu ziarniaka pszenicy

Celem niniejszych badań było bardziej precyzyjne niż z elektronowej mikroskopii skaningowej określenie rozkładu żelaza, a ponadto określenie stopnia utlenienia żelaza w badanym materiale roślinnym i magnetyzmu pojedynczego ziarniaka pszenicy.

3.1 Opis metody pomiarowej XAS

Promieniowanie synchrotronowe jest promieniowaniem elektromagnetycznym, emitowanym podczas zmiany kierunku ruchu naładowanych cząstek poruszających się z prędkościami relatywistycznymi w polu magnetycznym. Dzięki swojej dużej intensywności i silnej kolimacji wiązki oraz szerokiemu zakresowi energii promieniowanie synchrotronowe nadaje się szczególnie do badań struktury krystalicznej i elektronowej, co czyni je atrakcyjnym narzędziem badawczym w fizyce, chemii, krystalografii, biologii oraz medycynie.

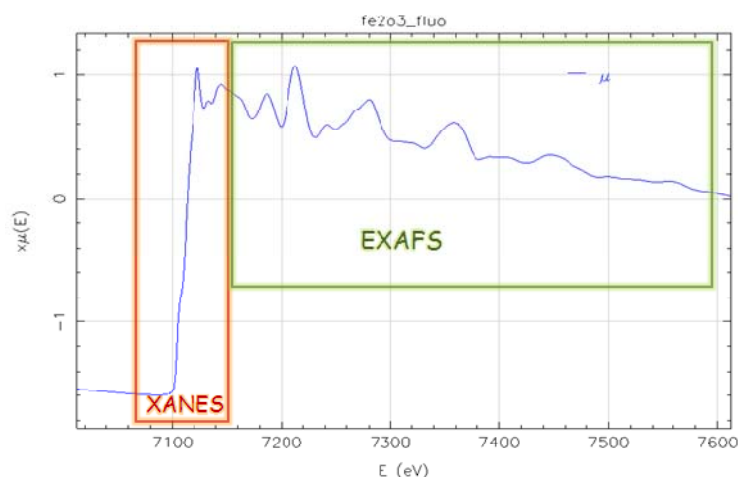
Bardzo ważną metodą pomiarową wykorzystującą promieniowanie synchrotronowe jest spektroskopia absorpcji promieniowania X (X-Ray Absorption Spectroscopy – XAS).

W pomiarze metodą XAS promieniowanie X o natężeniu I_0 , padające na próbkę o grubości x zostaje przez nią częściowo zaabsorbowane. Przy przejściu przez próbkę natężenie promieniowania zmniejsza się do wartości I . Znając grubość próbki i mierząc natężenie promieniowania padającego i promieniowania które przeszło przez próbkę

można wyznaczyć współczynnik absorpcji promieniowania μ . Zależność współczynnika absorpcji od energii promieniowania cechują charakterystyczne "schodki" – krawędzie absorpcji. Odpowiadają one zwiększonemu prawdopodobieństwu absorpcji kwantu promieniowania, gdy jego energia zrówna się z odległością poziomu Fermiego w ciele stałym (lub energii pierwszych niezajętych stanów w atomie lub cząsteczce) od głębszych poziomów elektronowych, np. 1s, 2s, 2p... Krawędzie odpowiadające tym przejściom oznacza się odpowiednio jako K, L₁, L₂...

Pomiar zależności współczynnika absorpcji od energii może być wykonany w transmisji lub we fluorescencji. Metodę transmisji stosuje się do pomiarów materiałów w których koncentracja badanego pierwiastka jest duża. Metoda fluorescencji jest bardzo czuła, dlatego nadaje się do pomiarów materiałów, w których znajduje się bardzo mało atomów badanego pierwiastka [47, 156, 166, 167].

Na wykresie zależności współczynnika absorpcji od energii $\mu(E)$ możemy wyróżnić dwa obszary odpowiadające spektroskopii przykrawędziowej (X-ray Absorption Near Edge Spectroscopy – XANES) i rozciągłej strukturze subtelnej widma absorpcji (Extended X-Ray Absorption Fine Structure – EXAFS), (rys. 3.1).



Rys. 3.1. Wykres zależności współczynnika absorpcji od energii kwantów promieniowania, $\mu(E)$, z zaznaczonymi obszarami XANES i EXAFS – widmo metalicznego Fe, zmierzone podczas pomiarów próbek roślinnych, o których mowa w pracy [13]

Spektroskopia promieniowania X w pobliżu krawędzi absorpcji (XANES) to metoda polegająca na analizie kształtu i położenia krawędzi absorpcji w zakresie energii od około 20 eV poniżej – do około 40 eV powyżej progu absorpcji. Rozciągnięta struktura subtelna absorpcji promieniowania X (EXAFS) opiera się na analizie oscylacji krzywej $\mu(E)$ od krawędzi absorpcji [12, 13] do kilkuset lub nawet ponad tysiąca elektronowoltów powyżej niej.

Krawędź absorpcji dla każdego pierwiastka chemicznego w stanie podstawowym ma ściśle określoną energię i kształt, będąc jego "odciskiem palca". Wysokość krawędzi jest proporcjonalna do ilości pierwiastka absorbującego na którego krawędzi wykonywany jest pomiar. Położenie krawędzi na skali energii zależy od stopnia utlenienia danego pierwiastka. Im wyższy jest stopień utlenienia, tym wyższa

jest energia krawędzi. Najsilniejszą zależność obserwuje się dla krawędzi K, gdzie np. dla pierwiastków przejściowych takich, jak mangan, czy żelazo jest to 4–5 elektronowoltów na jednostkę stopnia utlenienia.

Z analizy widm XANES możemy również uzyskać informację o symetrii lokalnego otoczenia. Niska symetria (np. tetragonalna) przejawia się w wysokiej intensywności tzw. pik przedkrawędziowego pojawiającego się przy energiach nieco poniżej krawędzi absorpcji. XANES niesie również informacje o gęstości stanów nieobsadzonych powyżej energii Fermiego, która przejawia się tzw. białą linią. Jest to pierwszy pik bezpośrednio powyżej krawędzi absorpcji. Im mniej mamy elektronów walencyjnych w danym atomie (jonie), tym wyższy jest ten pik [15, 79].

Metoda EXAFS polega na analizie oscylacji krzywej $\mu(E)$ powyżej progu absorpcji, które są związane z propagacją fotoelektronu wybitego przez kwant promieniowania X. Fala de Broglie'a takiego fotoelektronu rozprasza się na sąsiednich atomach (jonach) i interferuje z falą nierozproszoną. W zależności od względnej relacji długości wektora falowego fotoelektronu (która rośnie ze zwiększaniem energii) z odległościami sąsiednich atomów interferencja może być konstruktywna, destruktywna, lub odpowiadać sytuacji pośredniej. Przejście ze skali energii do skali wektora i następnie transformacja Fouriera takiego widma EXAFS daje nam rozkład gęstości elektronowej w funkcji odległości od atomu absorbującego kwant promieniowania X. Za pomocą metody EXAFS można określić liczbę i rodzaj sąsiadów w najbliższych strefach koordynacyjnych oraz ich odległości od atomu absorbującego [79, 156].

3.2 Wyniki pomiarów

Pomiary wykonane zostały przy udziale autora niniejszej rozprawy w ośrodku DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) w Hamburgu. Wykorzystano promieniowanie synchrotronowe wytworzone w synchrotronie DORIS III (Double Ring Store), leżącym na terenie DESY i "zasilającym" laboratorium synchrotronowe HASYLAB (Hamburger Synchrotronstrahlungslabor) [203].

Wykonano pomiary dla próbek dwóch gatunków roślin:

- ziaren pszenicy – pochodzącej z Małopolskiej Centrali Roślin,
- nasion rydza (Inianki) – wyhodowanej przez Akademię Rolniczą w Poznaniu przez grupę Profesora Tadeusza Łuczkiwicza.

Do badań zostały przygotowane dwa rodzaje próbek:

1. Ziarna i nasiona badanych roślin przecięte na pół i przymocowane do uchwytu taśmą kaptonową, wykonano na nich pomiar mikrowiązką w celu otrzymania informacji różnych miejsc przekroju,

2. Ziarna i nasiona badanych roślin utarte w moździerz na możliwie jednolitą masę, z niej uformowane zostały pastylki – w pastylkarce laboratoryjnej, siłą 2 ton, wykonano na nich pomiary dostarczające informacji "uśrednionej".

W celu przeprowadzenia analizy stopnia utlenienia żelaza zmierzone zostały również próbki wzorcowe, którymi były tlenki żelaza:

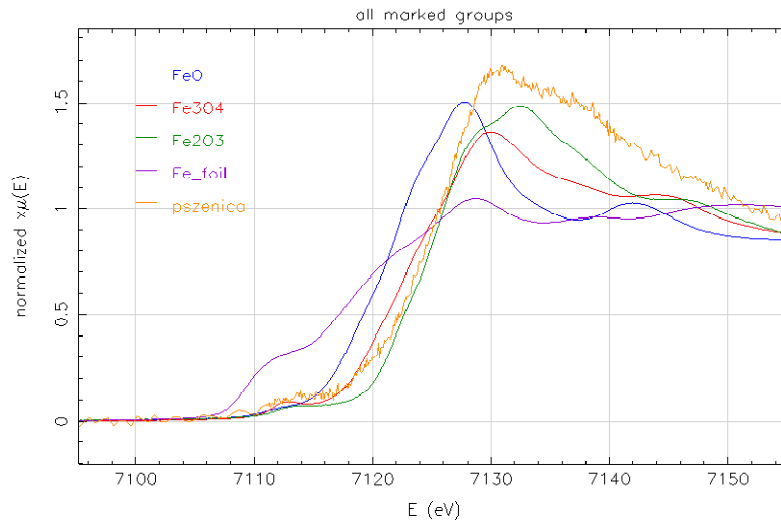
- **magnetyt Fe_3O_4** – związek w którym średni stopień utlenienia żelaza wynosi +2.67,
- **hematyt Fe_2O_3** – żelazo na +3 stopniu utlenienia,
- **tlenek żelaza FeO** – żelazo na +2 stopniu utlenienia,
- **folia metaliczna Fe o grubości $5\mu\text{m}$** – żelazo na 0 stopniu utlenienia [12, 13].

Pomiary zostały przeprowadzone w temperaturze pokojowej w całym zakresie widm absorpcyjnych obejmującym zarówno XANES, jak i EXAFS. W niniejszej rozprawie przedstawione i przedyskutowane są wyniki XANES, jako istotne dla określenia rozkładu głównego pierwiastka magnetycznego – żelaza oraz jego stopnia utlenienia w badanych próbkach. Wyniki EXAFS, jako nie wnoszące istotnych nowych informacji z punktu widzenia tezy pracy, nie są w niej dyskutowane.

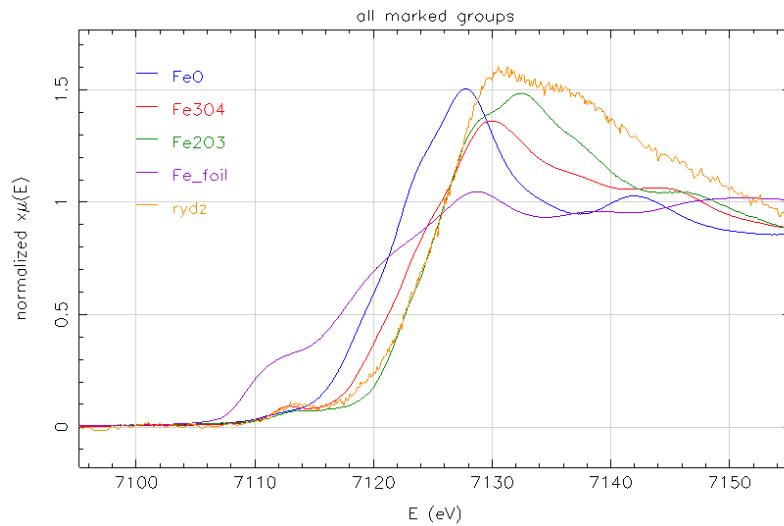
3.3 Analiza widm XANES

3.3.1 Wyniki uśrednione

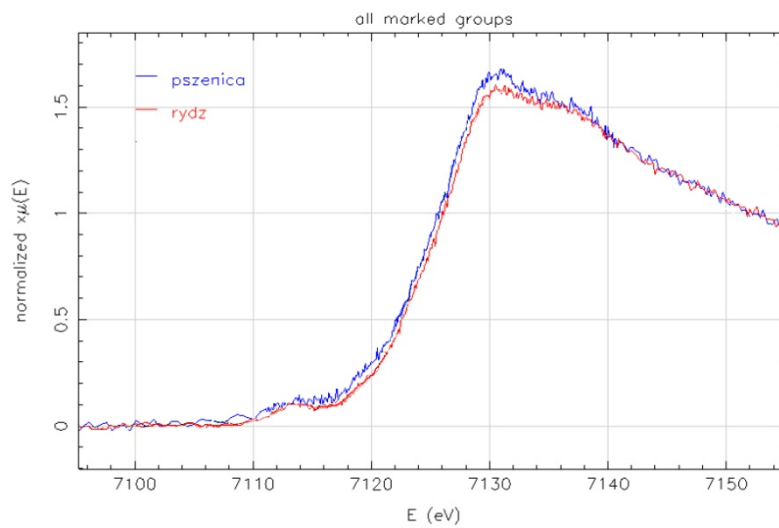
Widma z obszaru XANES można przeanalizować w oparciu o zestawienie widm wybranych próbek na jednym wykresie w celu porównania kształtu i położenia krawędzi absorpcji. Oprócz widm badanych próbek roślinnych na wykresy rys. 3.2 – 3.4 naniesione zostały także widma próbek referencyjnych: folii metalicznej, magnetytu Fe_3O_4 , hematytu Fe_2O_3 i tlenku żelaza FeO w celu analizy stopnia utlenienia żelaza w badanych próbkach.



Rys. 3.2. Widmo próbki pszenicy wraz z widmami próbek referencyjnych



Rys. 3.3. Widmo próbki rydza wraz z widmami próbek referencyjnych

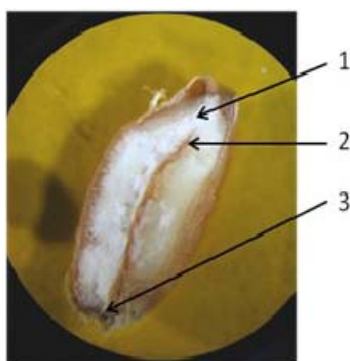


Rys. 3.4. Zestawienie widm próbek pszenicy i rydza

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 znajdujące się w ziarniakach pszenicy i nasionach rydza znajduje się na +3 stopniu utlenienia, tak jak ma to miejsce w hemacie – Fe_2O_3 .

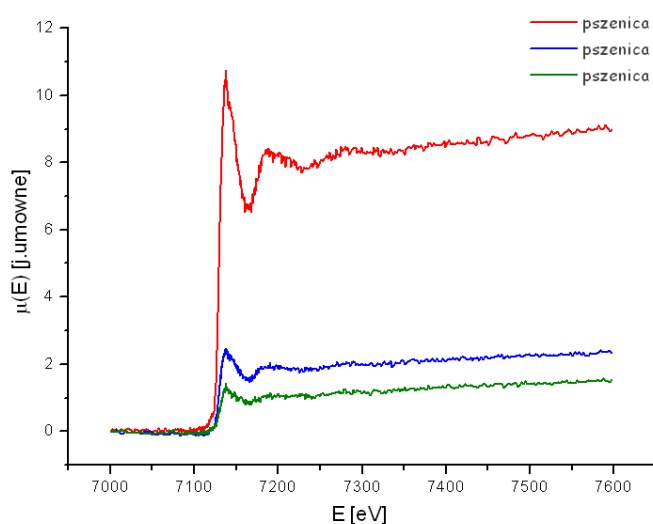
3.3.2 Rozkład zawartości Fe w ziarniaku pszenicy

Badania w poszczególnych miejscach przekroju ziaren pszenicy (rys. 3.5) wykonane zostały z zastosowaniem mikrowiązki uzyskiwanej za pomocą mikrokapilary optycznej na stanowisku pomiarowym L.



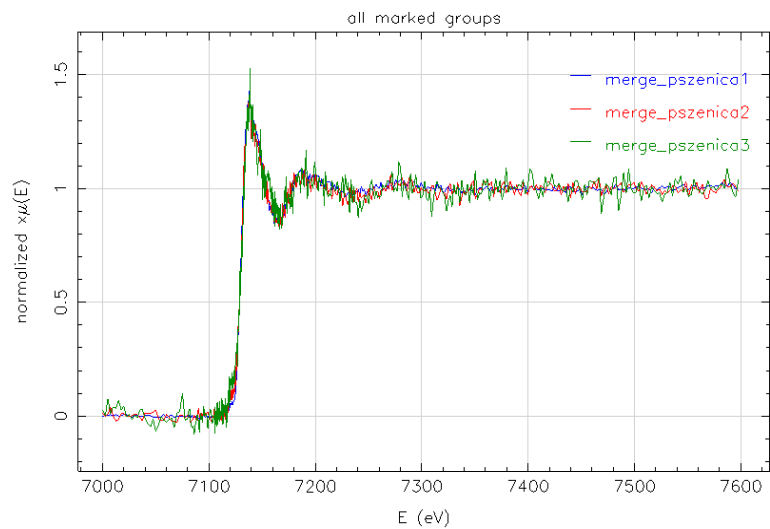
Rys. 3.5. Zdjęcie przekroju ziarna pszenicy; cyframi oznaczone zostały miejsca wykonywania pomiarów

Pomiary przeprowadzono w całym zakresie energii widma absorpcyjnego (XANES i EXAFS) przy krawędzi K żelaza. Otrzymane wyniki są przedstawione na wykresach rys. 3.6. – 3.8.

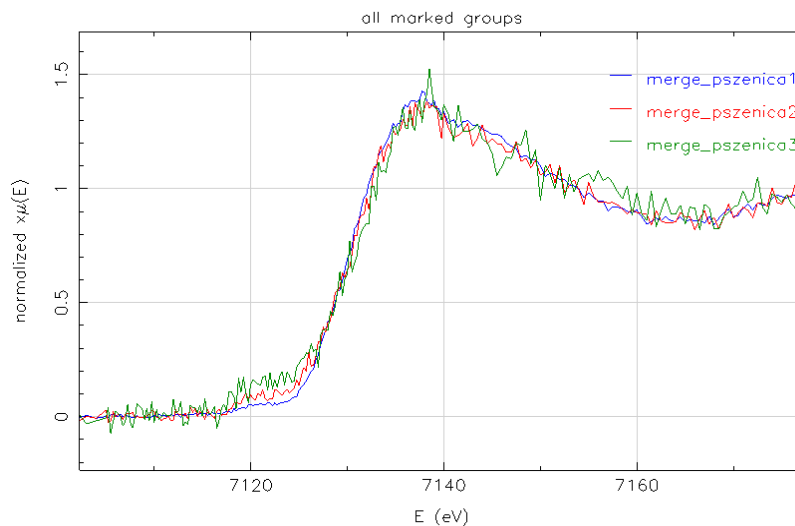


Rys. 3.6. Nieznormalizowane widma absorpcyjne zmierzone na krawędzi K żelaza w trzech miejscach na przekroju ziarna pszenicy

Widma nieznormalizowane zestawione razem pokazują względną ilość żelaza w danych miejscach przekroju ziarniaka. Ponieważ miarą lokalnej koncentracji żelaza jest skok na krawędzi absorpcji, z ich porównania wynika, że najwięcej żelaza znajduje się w warstwie aleuronowej ziarniaka pszenicy, mniej w zarodku, a najmniej w okrywie owocowo–nasiennej. Odpowiednie skoki na krawędzi wynoszą 7.5, 1.85 i 0.98, z czego wynika, że względne koncentracje w tych miejscach mają się jak 7.7:1.9:1.



Rys. 3.7. Znormalizowane widma absorpcyjne zmierzone na krawędzi K żelaza w trzech miejscach na przekroju ziarna pszenicy



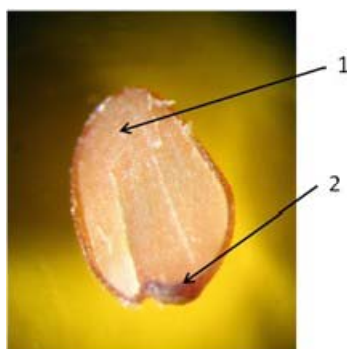
Rys. 3.8. Obszar XANES widm absorpcyjnych zmierzonych na krawędzi K żelaza w trzech miejscach na przekroju ziarna pszenicy

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. We wszystkich widmach występuje mały pik przedkrawędziowy, który jest największy w miejscu 3 – zarodku.

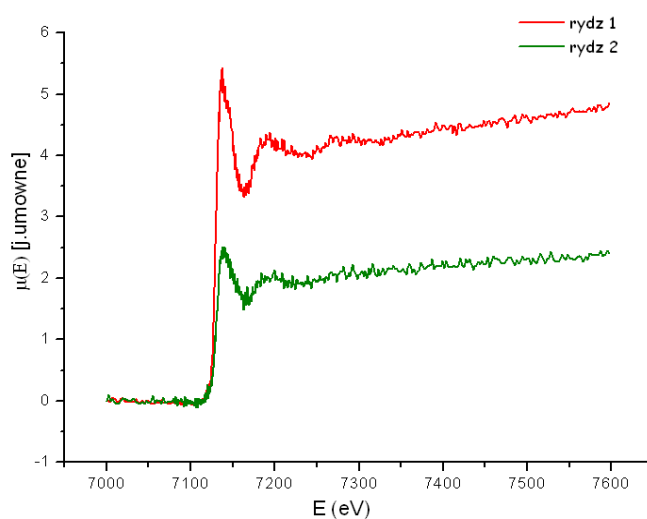
Sugeruje on niewielkie różnice w lokalnej symetrii otoczenia żelaza. Większe szумы dla widm z miejsc 2 i 3 są związane ze znacznie niższą koncentracją żelaza niż w miejscu 1.

3.3.3 Rozkład zawartości Fe w nasionach lniarki (rydza)

Pomiary dla nasiona lniarki wykonane zostały tylko w dwóch miejscach (rys. 3.9), ponieważ jego wnętrze jest dosyć jednorodne w porównaniu z pszenicą. Otrzymane wyniki przedstawione są na wykresach rys. 3.10 – 3.12.

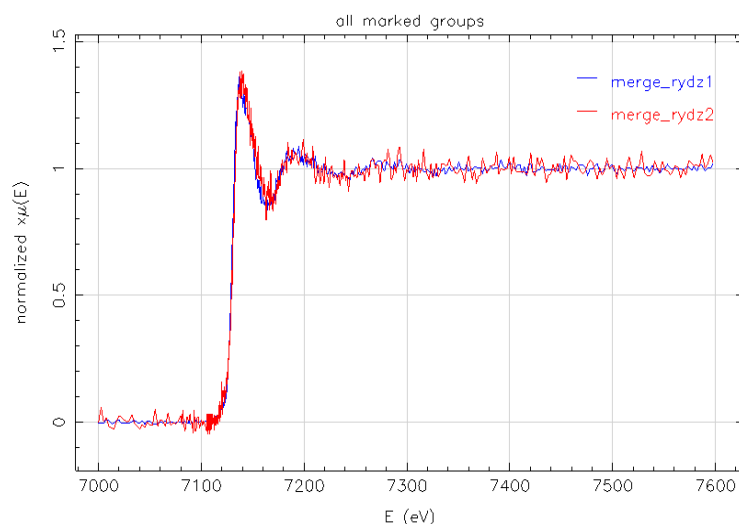


Rys. 3.9. Zdjęcie nasiona lniarki z oznaczonymi miejscami wykonywania pomiarów

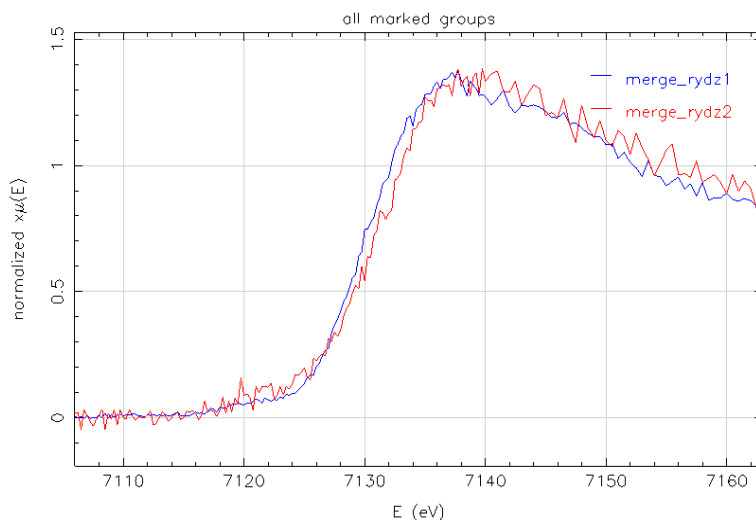


Rys. 3.10. Nieznormalizowane widma absorpcyjne zmierzone na krawędzi K żelaza w dwóch miejscach na przekroju nasiona rydza

Widma nieznormalizowane zestawione razem pokazują względną ilość żelaza w danych miejscach przekroju nasiona. Jak już wspomniano powyżej, miarą lokalnej koncentracji żelaza jest skok na krawędzi absorpcji, tak więc z ich porównania wynika, że we wnętrzu nasiona mamy około dwa razy większą koncentrację żelaza, niż przy okrywie owocowo–nasiennej.



Rys. 3.11. Znormalizowane widma absorpcyjne zmierzone na krawędzi K żelaza w dwóch miejscach na przekroju nasiona rydza



Rys. 3.12. Obszar XANES widm absorpcyjnych zmierzonych na krawędzi K żelaza w dwóch miejscach na przekroju nasiona rydza

Widma znormalizowane (rys. 3.11 i 3.12), 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 rydza.

3.4 Wnioski z przeprowadzonych badań XANES

Analiza widm XANES na krawędzi K żelaza otrzymanych z pomiarów zmielonych ziarniaków pszenicy i nasion rydza wykazała, że żelazo znajdujące się w badanych próbkach występuje na +3 stopniu utlenienia.

Porównanie wielkości skoku na krawędzi absorpcji widm XANES zmierzonych w różnych miejscach przekroju ziarniaka i nasiona pokazuje, że najwięcej żelaza znajduje się wewnątrz ziaren, w warstwie endospermy, a najmniej – w okrywie owocowo–nasiennej.

Znormalizowane widma XANES zmierzone w różnych miejscach przekroju ziarniaka pokrywają się dla pszenicy, co oznacza te same stopnie utlenienia (wartościowości) żelaza odpowiadające Fe^{3+} i takie same otoczenia atomowe (jonowe). Nieznaczna różnica położenia krawędzi absorpcji pomiędzy widmami ze środka nasiona i przy okrywie owocowo–nasiennej rydza może być związana z nieco różniącymi się stopniami utlenienia Fe w tych miejscach.

3.5 Badania właściwości magnetycznych ziarniaków pszenicy

3.5.1 Podstawy magnetyzmu

W badaniach właściwości fizycznych (zwłaszcza magnetycznych) – analogicznych do prezentowanych w niniejszej pracy, częściej wykorzystuje się układ CGS niż SI. Stąd Autor – dla przypomnienia czytelnikowi – zestawił w tabeli 3.1 współczynniki przeliczeniowe pomiędzy jednostkami SI i CGS dla podstawowych wielkości fizycznych w magnetyzmie.

Tabela 3.1. Wielkości fizyczne używane w magnetyzmie w jednostkach SI oraz cgs

Wielkość	SI	CGS
Moment magnetyczny μ	Am^2	$emu = 10^{-3} Am^2$
Namagnesowanie $M = \mu/V$	A/m	$emu/cm^3 = 4\pi Oe = 10^3 A/m$
Natężenie pola H	A/m	$emu/cm^3 = 4\pi Oe = 10^3 A/m$
Indukcja pola magn. $B = \mu_0 H$	$T = N/Am$	$Gs = 10^{-4} T$
Podatność magnetyczna χ	bezwymiarowa	bezwymiarowa
Przenikalność magn. próżni μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} N/A^2$	bezwymiarowa
Magneton Bohra μ_B	$9,2741 \cdot 10^{-24} J/T$	$9,2741 \cdot 10^{-21} emu$
Stała Boltzmanna k_B	$1,38062 \cdot 10^{-23} J/K$	$1,38062 \cdot 10^{-16} erg/K$

Magnetyzm jest zjawiskiem o pochodzeniu kwantowomechanicznym, wynikającym z budowy atomu, a ściślej ze struktury obsadzenia powłok elektronowych. Moment magnetyczny atomu może pochodzić od: orbitalnego momentu pędu elektronów wynikającego z ich ruchu wokół jądra, spinu (wewnętrznego krętu) elektronów oraz zmiany momentu orbitalnego pod wpływem przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego. Dwa pierwsze składniki dają wkład do namagnesowania paramagnetycznego, natomiast trzeci – do diamagnetycznego. Dla atomów z zapełnionymi powłokami elektronowymi ich całkowite momenty orbitalne i spinowe są równe zero, a jedyny wkład (zwykle niewielki i ujemny) pochodzi od momentu indukowanego zewnętrznym polem. Istnieje jednak szereg pierwiastków (grupy przejściowe d i f), które mają niezapełnione powłoki elektronowe, a więc ich momenty magnetyczne są różne od zera [76]. Spiny jądrowe również wnoszą pewien wkład do magnetyzmu, jednak jest on 3 rzędy wielkości mniejszy od elektronowego i w większości przypadków możemy go pominąć.

Zależność pomiędzy indukcją pola magnetycznego \mathbf{B} , a jego natężeniem \mathbf{H} dana jest wzorem:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (3.1)$$

gdzie

μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni równą $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ V}\cdot\text{s}/(\text{A}\cdot\text{m})$.

Po przyłożeniu zewnętrznego pola w materiale oprócz samoistnych momentów magnetycznych (jeżeli takowe zawiera) pojawiają się momenty indukowane przez to pole. Momenty samoistne i indukowane będą wytwarzać własne pole magnetyczne i całkowita indukcja \mathbf{B} będzie sumą części pochodzących od zewnętrznego pola i namagnesowania:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (3.2)$$

\mathbf{M} jest tutaj namagnesowaniem, które definiuje się jako gęstość momentów magnetycznych:

$$\mathbf{M} = \boldsymbol{\mu} \frac{N}{V} \quad (3.3)$$

gdzie:

$\boldsymbol{\mu}$ – moment magnetyczny atomu,

$\frac{N}{V}$ - ilość atomów na jednostkę objętości.

Współczynnik proporcjonalności χ pomiędzy namagnesowaniem, a natężeniem przyłożonego pola magnetycznego nazywamy podatnością magnetyczną [76]:

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H} \quad (3.4)$$

Podatność w układzie jednostek cgs jest wielkością bezwymiarową i odnosi się ją do jednego mola substancji lub do jednostki masy. Podatność magnetyczna χ związana z momentami samoistnymi jest dodatnia (ustawiają się one zgodnie z polem). Dla diamagnetycznej polaryzacji indukowanej jest ona ujemna, jako wynik powstawania prądów wirowych indukowanych przez zewnętrzne pole magnetyczne zgodnie z regułą Lenza mówiącą, że moment magnetyczny prądów indukowanych przez zewnętrzne pole magnetyczne przeciwdziała temu polu. Atomy diamagnetyczne nie posiadają własnych momentów magnetycznych. Wartość podatności próżni jest równa zero, natomiast dla typowych diamagnetyków, z wyjątkiem nadprzewodników, jest zazwyczaj mniejsza niż 10^{-4} . Chociaż wszystkie materiały wykazują własności diamagnetyczne, to momenty indukowane są zwykle znacznie mniejsze od momentów samoistnych.

Momenty samoistne są związane ze spinem oraz ruchem orbitalnym elektronów w atomie. Dla pojedynczego atomu moment magnetyczny μ_l związany z orbitalnym momentem pędu \mathbf{L} opisany jest wzorem:

$$\mu_l = -\frac{g_l \mu_B}{\hbar} \mathbf{L} \quad (3.5)$$

gdzie:

$g_l = 1$ – orbitalny czynnik g ,

μ_B – jednostka atomowego magnetycznego momentu dipolowego, nosi nazwę magnetonu Bohra $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$.

Podstawiając do wzoru (3.5) zależność μ_B , otrzymuje się:

$$\mu_l = -\frac{e}{2m} \mathbf{L} \quad (3.6)$$

Orbitalny moment magnetyczny ma zwrot przeciwny do \mathbf{L} ze względu na ujemny znak ładunku elektronu.

Analogiczną postać ma związek pomiędzy spinowym momentem magnetycznym μ_s , a spinowym momentem pędu \mathbf{S} :

$$\mu_s = -\frac{g_s \mu_B}{\hbar} \mathbf{S} = -\frac{e}{m} \mathbf{S} \quad (3.7)$$

Współczynnik g_s w powyższym wzorze nazywany jest spinowym czynnikiem g , a jego wartość jest dwa razy większa niż dla czynnika orbitalnego g_l .

W substancjach paramagnetycznych wektor namagnesowania \mathbf{M} ma kierunek zgodny z kierunkiem \mathbf{B} , a podatność magnetyczna χ ma wartość dodatnią. Dla typowych materiałów paramagnetycznych jest ona rzędu 10^{-3} . Dodatnia wartość χ oznacza, że w przyłożonym zewnętrznym polu \mathbf{B} momenty magnetyczne będą ustawiały się równolegle do pola co wynika z minimalizacji energii przy takim ułożeniu. Dlatego też pole indukowane dodaje się do przyłożonego zewnętrznego pola. Chaotyczne ruchy momentów magnetycznych wynikające z drgań termicznych powodują, że podatność magnetyczna χ jest zależna od temperatury, a ściślej – od stosunku energii oddziaływania dipola magnetycznego z przyłożonym zewnętrznym polem do energii termicznej $k_B T$ (k_B – stała Boltzmanna). Dla małych pól i niezbyt

niskich temperatur ($\mu_B \ll k_B T$) podatność maleje ze wzrostem temperatury zgodnie z zależnością nazywaną prawem Curie–Weissa:

$$\chi = \frac{C}{T} \quad (3.8)$$

gdzie: C – stała Curie, charakterystyczna dla danego materiału paramagnetycznego.

Jeżeli oddziaływanie wymienne pomiędzy spinami sąsiednich atomów (jonów) paramagnetycznych nie jest zaniedbywalne, podatność magnetyczna przyjmuje postać:

$$\chi = \frac{C}{T + \theta} \quad (3.9)$$

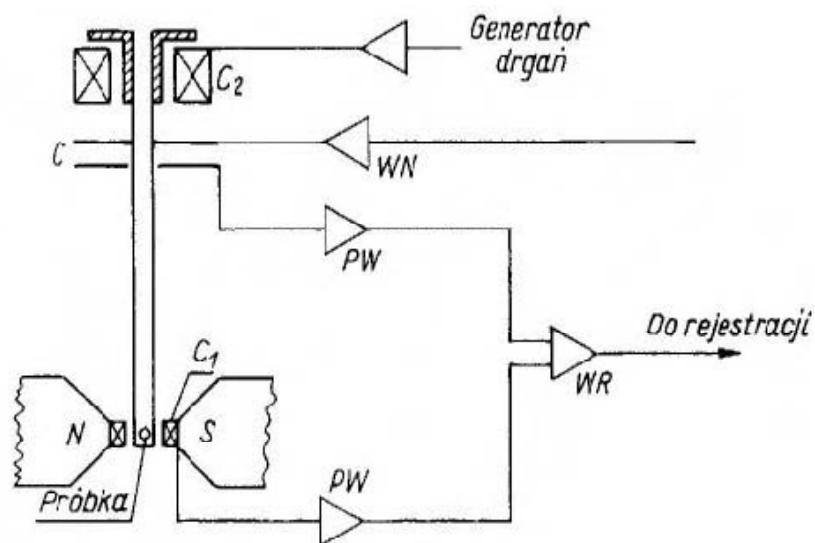
gdzie: θ – stała o wymiarze temperatury przyjmującą dodatnią wartość gdy oddziaływanie jest typu ferromagnetycznego, a ujemną gdy oddziaływanie jest antyferromagnetyczne.

3.5.2 Metoda pomiarowa i aparatura – magnetometr z wibrującą próbką

W celu scharakteryzowania materiału pod względem magnetycznym zwykle mierzy się jego namagnesowanie w funkcji przyłożonego zewnętrznego pola i temperatury. Z tych zależności można wyznaczyć podatność magnetyczną i zmiany w funkcji temperatury, a na ich podstawie określić np. temperatury magnetycznych przejść fazowych. Jednym z częściej używanych do takich pomiarów narzędzi jest magnetometr wibracyjny (Vibrating Sample Magnetometer – VSM – magnetometr z wibrującą próbką). Jego poglądowy schemat jest przedstawiony na rys. 3.13. Niemagnetyczny pręt, na końcu którego umieszczona jest próbka, porusza się wewnątrz dwóch cewek. Cewka górna steruje drganiami próbki, a dolna służy do pomiaru. Próbka znajduje się w polu magnetycznym elektromagnesu, magnesu stałego lub nadprzewodzącego i porusza się w górę i w dół ruchem harmonicznym prostym. Cewka górna również znajduje się w tym polu. Poruszająca się próbka wytwarza zmienne pole magnetyczne czyli w obwodzie (zgodnie z prawem indukcji Faraday’a) indukuje się siła elektromotoryczna ϵ_{SEM} :

$$\epsilon_{SEM} = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad (3.10)$$

Jest ona równa zmianie strumienia magnetycznego ϕ_B w czasie. Metoda magnetometrii wibracyjnej jest metodą indukcyjną ponieważ w cewce pomiarowej powstaje sygnał proporcjonalny do momentu magnetycznego próbki.



Rys. 3.13. Schemat magnetometru wibracyjnego. C – cewki, WN –wzmacniacz napięcia, WR – wzmacniacz różnicowy [152]

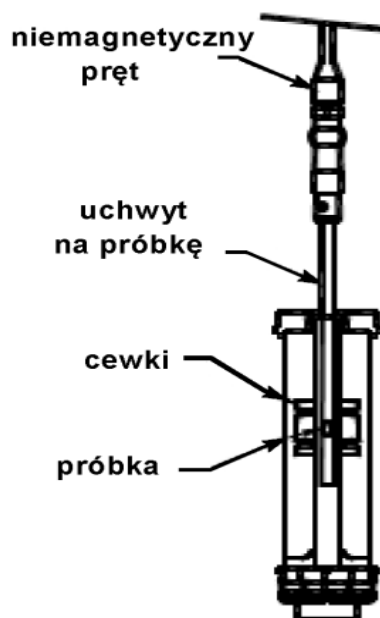
Do badań magnetometrycznych użyte zostało urządzenie – PPMS (Physical Property Measurement System) produkcji firmy Quantum Design znajdująca się w Katedrze Fizyki Ciała Stałego Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. Jedną z opcji pomiarowych tego zestawu, szczególnie użyteczną do pomiarów próbek o słabych własnościach magnetycznych, takich jak np. materiały roślinne, jest wysokiej czułości magnetometr z wibrującą próbką. Sterujący systemem komputer z odpowiednim oprogramowaniem pozwala na automatyzację procedury pomiarowej i wstępną obróbkę wyników.

Na rysunku 3.14 został przedstawiony schemat układu pomiarowego. Składa się on z wibratora napędzającego i kontrolującego ruch próbki oraz z układu cewek detekcyjnych. W skład systemu wchodzi komputer z odpowiednim oprogramowaniem i osprzęt elektroniczny do sterowania wibratorem i detekcji sygnału z cewek pomiarowych.



Rys. 3.14. Układ pomiarowy PPMS z przekrojami ilustrującymi szczegóły opcji VSM [152]

Próbka jest zakładana na odpowiedni uchwyt i umieszczana w środku zespołu cewek, jak przedstawiono na rysunku 3.15. Cały układ umieszcza się w komorze pomiarowej której dolna część znajduje się w środku magnesu nadprzewodzącego mogącego wytwarzać pole w zakresie od -9 do 9 Tesli. Odpowiedni układ regulujący umożliwia pomiary w zakresie temperatur od 2 do 400 K lub 300 – 1200 K.

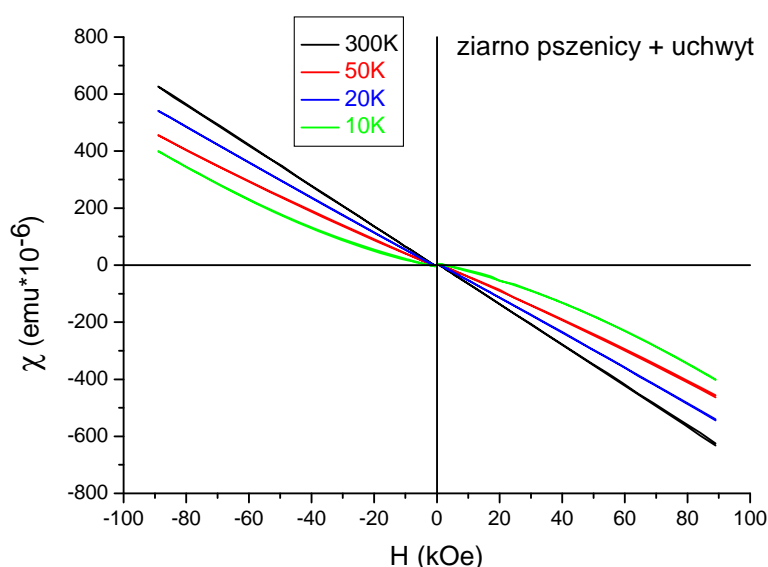


Rys. 3.15. Schemat przedstawiający położenie próbki wewnątrz układu cewek pomiarowych [152]

Przy oscylacjach próbki o amplitudach rzędu 1–3 mm oraz częstotliwości równej 40 Hz możliwy jest pomiar zmian namagnesowania mniejszych niż 10^{-6} emu.

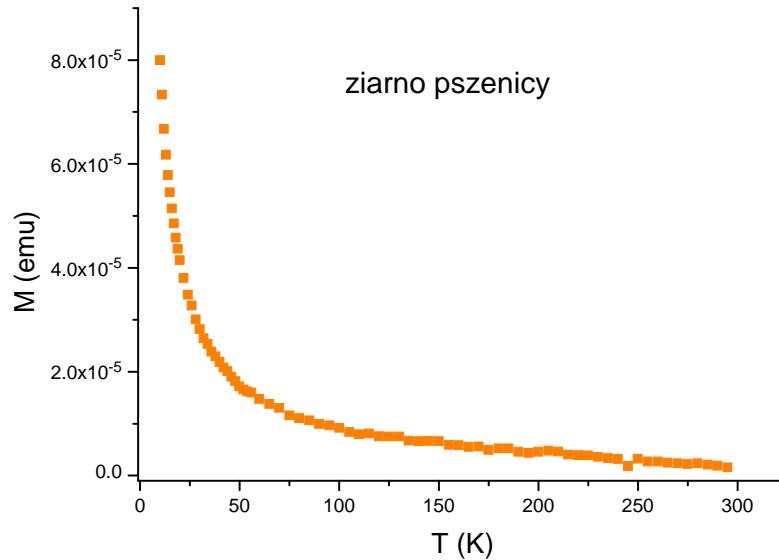
3.5.3 Wyniki pomiarów magnetometrycznych ziarniaka pszenicy

Pomiary magnetometryczne przeprowadzono dla pojedynczego ziarenka pszenicy. Zmierzono zależność namagnesowania od temperatury w polu magnetycznym o natężeniu 10 kOe w zakresie temperatur od 10 do 300 K. Dla kilku temperatur z całego zakresu wykonano również pomiary krzywych magnesowania $M(H)$, w zakresie od +90 do -90 kOe, (rys 3.16).



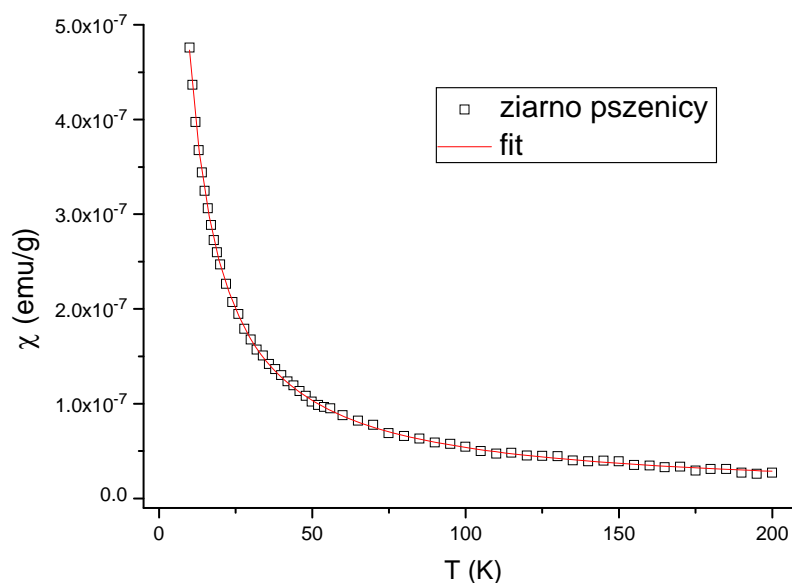
Rys. 3.16. Krzywe magnesowania w zakresie od +90 do -90 kOe dla ziarna pszenicy

Krzywe magnesowania przedstawione na rysunku 3.16 pokazują dominującą ujemną podatność diamagnetyczną pochodzącą głównie od uchwytu próbki. Mają one nachylenie malejące z obniżaniem temperatury. Ponieważ wkład diamagnetyczny jest w przybliżeniu niezależny od temperatury, wskazuje to na obecność dodatniego wkładu, rosnącego z obniżaniem temperatury, czyli wkładu paramagnetycznego pochodzącego od próbki. Krzywe w niskich temperaturach wykazują odchylenie od liniowej zależności od pola magnetycznego, o największej krzywiznie w pobliżu zera. Jest to dodatkowy wskaźnik obecności wkładu paramagnetycznego, dla którego w niskich temperaturach należy się spodziewać nieliniowej zależności od pola magnetycznego.



Rys. 3.17. Zależność namagnesowania paramagnetycznego ziarna pszenicy w polu 10 kOe od temperatury

Zależność podatności magnetycznej (wartości M/H) ziarna pszenicy od temperatury uzyskana z pomiaru (po odjęciu zmierzonego wkładu od uchwytu próbki) przedstawiona jest na rysunku 3.17. 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, co jest przedstawione na rysunku 3.18. Taki wybór zakresu fitowania wynikał stąd, że w wyższych temperaturach jest duży udział "szumów" i artefaktów pomiarowych (widocznych na rysunku 3.18 jako odchylenia od przebiegu hiperbolicznego) w porównaniu z sygnałem od podatności paramagnetycznej próbki.



Rys. 3.18. Zależność temperaturowa podatności ziarna pszenicy z dofitowaną krzywą teoretyczną

Wartość parametru a odpowiadającego stałej Curie otrzymana z dofitowania wynosi 5.08×10^{-6} emu K/g. Wartość parametru b odpowiadająca paramagnetycznej temperaturze θ we wzorze przedstawiającym prawo Curie-Weissa (3.8) jest ujemna i wynosi około -1 K, co oznacza obecność słabych oddziaływań antyferromagnetycznych pomiędzy spinami paramagnetycznych atomów obecnych w ziarnie pszenicy.

Porównanie otrzymanej wartości stałej Curie, 5.08×10^{-6} emu K/g, z przewidywaną teoretycznie dla Fe^{3+} o spinie $5/2$ (lub dla Mn^{2+} $5/2$, która jest tylko o 2% większa) wynoszącą 78×10^{-3} emu K/g daje przybliżoną zawartość takich jonów rzędu 65 ppm. Koncentracje Fe i Mn wyznaczone metodą analizy fluorescencyjnej wynoszą odpowiednio od 71 do 132 ppm dla Fe i od 26 do 52 ppm dla Mn, co przy założeniu stanów wysokospinowych tych pierwiastków powinno dać ponad dwa razy większą stałą Curie. Mniejsza wartość stałej otrzymanej z pomiarów, przy równoczesnym stwierdzeniu obecności oddziaływań antyferromagnetycznych (ujemny znak paramagnetycznej temperatury Curie θ) może być spowodowana klasteryzacją typu antyferromagnetycznego części spinów Fe w ferredoksynach, w których znajduje się około 80% żelaza występującego w ziarniakach.

3.5.4 Wnioski z badań właściwości magnetycznych

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 dofitowana 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 .

Rozdział 4

Opis matematyczny sferoidy spłaszczonej

Analiza przeprowadzona w rozdziale 2 pokazuje warstwową budowę badanych ziarniaków i nasion. Jednak rozkład obserwowanych pierwiastków jest równomierny w poszczególnych warstwach, w związku z tym można przyjąć, że właściwości magnetyczne poszczególnych warstw są bardzo zbliżone do siebie. Zatem w modelu matematycznym, służącym do obliczeń rozkładu pola magnetycznego wewnątrz ziarniaka i nasiona, można opisać je jako jednowarstwowe. Natomiast kształt badanych ziarniaków i nasion najwierniej odwzorowuje sferoida spłaszczona.

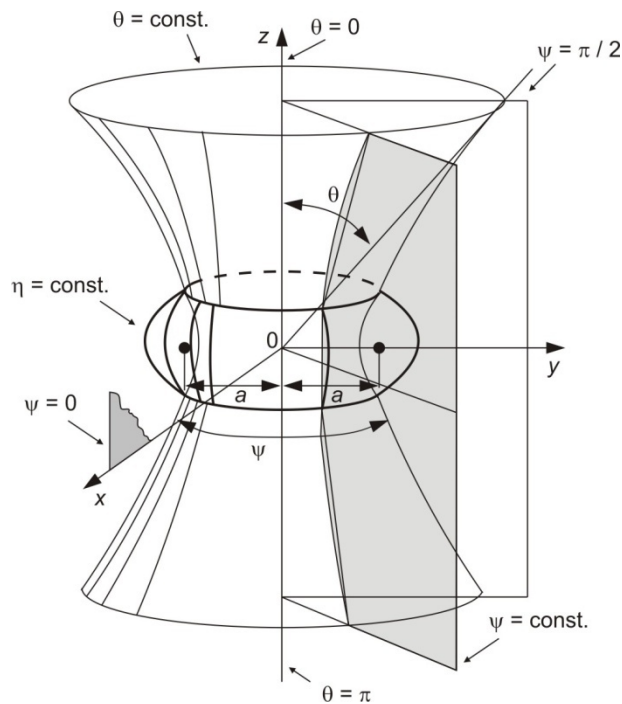
Zaprezentowane w rozdziale 3 badania rozkładu żelaza i jego stopnia utlenienia wskazują na większą koncentrację żelaza w warstwie wewnętrznej (endosperma – bielmo) niż w warstwach zewnętrznych np. w warstwie okrywy owocowo-nasiennej. Jednak wielkość warstwy wewnętrznej, 70 % – 80 % całego ziarniaka, potwierdza wcześniejsze założenie i pozwala na modelowanie ziarniaków i nasion jako sferoidy jednowarstwowe. Badania właściwości magnetycznych, wykazują paramagnetyczny charakter ziarniaków.

Biorąc pod uwagę powyższe, można wnioskować, że ziarniaki pszenicy i nasiona lnianki na potrzeby obliczeń rozkładu pola magnetycznego wewnątrz oraz w ich otoczeniu, można przedstawić jako jednowarstwowe paramagnetyczne sferoidy.

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

4.1 Współrzędne sferoidy spłaszczonej

Układ współrzędnych sferoidy spłaszczonej tworzy się przez przyjęcie ortogonalnej rodziny współogniskowych elips i hiperbol oraz obrót dokoła mniejszych osi elips. Otrzymane powierzchnie współrzędnych są spłaszczonymi sferoidami, półpłaszczyznami i hiperboloidami jednopowłokowymi [105]. Sferoidę spłaszczoną i jej współrzędne przedstawiono na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Współrzędne sferoidy spłaszczonej [105]

Współrzędne sferoidy spłaszczonej (η, θ, ψ) związane są ze współrzędnymi prostokątnymi następującymi zależnościami:

$$\begin{aligned} x &= a \cosh \eta \sin \theta \cos \psi \\ y &= a \cosh \eta \sin \theta \sin \psi \\ z &= a \sinh \eta \cos \theta \end{aligned} \quad (4.1)$$

Powierzchnie $\eta = \text{const.}$ są sferoidami spłaszczonymi

$$\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (4.2)$$

gdzie:

$$b = a \cosh \eta, \quad c = a \sinh \eta,$$

a – ogniskowa rodziny sferoid.

Parametr η zmienia się w przedziale od 0 do ∞ . Jeżeli $\eta = 0$ sferoida przyjmuje kształt odcinka o długości $2a$, leżącego na osi OZ . Dla $\eta \rightarrow \infty$ sferoida staje się kulą o nieskończenie dużym promieniu.

Zmienna θ przyjmuje wartości w zakresie od 0 do π , przy czym wartość 0 związana jest z dodatnim kierunkiem osi z , w szczególnym przypadku $\theta = \pi/2$, hiperboloida przechodzi w płaszczyznę xy z kołowym otworem o promieniu a .

Natomiast zmienna ψ przyjmuje wartości w zakresie od 0 do 2π , jest to kąt mierzony wokół osi z . Powierzchnie o stałych wartościach ψ są półpłaszczyznami przechodzącymi przez oś z .

Przez analogię dla współrzędnej θ można używać określenia „długość geograficzna” a dla ψ „szerokość geograficzna” [105, 131].

4.1.1 Równanie Laplace’a we współrzędnych sferoidy spłaszczonej

Dla wyznaczenia rozkładu pola magnetycznego wewnątrz i w otoczeniu rozważanego modelu ziarniaka użyto równania Laplace’a w układzie sferoidy spłaszczonej. Metodą analityczną rozwiązania równania Laplace’a zastosowaną w obliczeniach jest metoda rozdzielania zmiennych. Metodę rozdzielania zmiennych można użyć tylko wtedy, kiedy granice środowisk są powierzchniami współrzędnych. Wobec tego przyjmuje się naturalne założenie, że w sferoidalnym modelu powierzchnie ograniczające środowiska są opisane równaniami $\eta = \text{const}$.

Chociaż metodę rozdzielania zmiennych uważa się za metodę o ograniczonym zakresie stosowania, to jednak jest ona skuteczna w wielu praktycznych przypadkach, których przegląd można znaleźć między innymi w pracy Mona i Spencera [105], a także Włodka i Prochownika [193].

Ponieważ w rozpatrywanym układzie są tylko dwa obszary, metoda rozdzielania zmiennych jest narzędziem najwygodniejszym. Stałe całkowania występujące w rozwiązaniach określających rozkład potencjału w poszczególnych obszarach wyznacza się poprzez sklejanie funkcji będących rozwiązaniami na granicach obszarów korzystając z warunków ciągłości składowych wektorów pola.

We współrzędnych sferoidy spłaszczonej równanie Laplace’a ma postać [105]:

$$\nabla^2 V_m = \frac{1}{a^2(\cosh^2\eta - \sin^2\theta)} \left(\frac{\partial^2 V_m}{\partial \eta^2} + \text{tgh}\eta \frac{\partial V_m}{\partial \eta} + \frac{\partial^2 V_m}{\partial \theta^2} + \text{ctg}\theta \frac{\partial V_m}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{a^2 \cosh^2\eta \sin^2\theta} \frac{\partial^2 V_m}{\partial \psi^2} = 0 \quad (4.3)$$

Za [105] przyjęto rozwiązanie równania (4.3) w postaci:

$$V_m = H(\eta)\Theta(\theta)\Psi(\psi) \quad (4.4)$$

Po rozdzieleniu zmiennych otrzymuje się układ równań:

$$\frac{d^2\Psi}{d\psi^2} + q^2\Psi = 0 \quad (4.5)$$

$$\frac{d^2\Theta}{d\theta^2} + \text{ctg}\theta \frac{d\Theta}{d\theta} + \left[p(p+1) + \frac{q^2}{\sin^2\theta} \right] \Theta = 0 \quad (4.6)$$

$$\frac{d^2H}{d\eta^2} + \operatorname{tgh}\eta \frac{dH}{d\eta} + \left[-p(p+1) + \frac{q^2}{\cosh^2\eta} \right] H = 0 \quad (4.7)$$

Rozwiązaniem ogólnym równania (4.5) jest wyrażenie:

$$\Psi = A \cos q\psi + B \sin q\psi \quad (4.8)$$

natomiast rozwiązaniem równania (4.6) jest zależność:

$$\theta = AP_p^q(\cos\theta) + BQ_p^q(\cos\theta) \quad (4.9)$$

W celu rozwiązania równania (4.7) przyjęto, że:

$$\xi = i \sinh \eta \quad (4.10)$$

i wstawiono zależność (4.10) do równania (4.7). W rezultacie otrzymuje się równanie Legendre'a

$$(\xi^2 - 1) \frac{d^2H}{d\xi^2} + 2\xi \frac{d^2H}{d\xi} - \left[-p(p+1) + \frac{q^2}{\xi^2 - 1} \right] H = 0 \quad (4.11)$$

którego rozwiązaniem ogólnym jest wyrażenie:

$$H = AP_p^q(i \sinh \eta) + BQ_p^q(i \sinh \eta) \quad (4.12)$$

gdzie:

P_p^q – stowarzyszona funkcja Legendre'a pierwszego rodzaju (rzędu q i stopnia p),
 Q_p^q – stowarzyszona funkcja Legendre'a drugiego rodzaju (rzędu q i stopnia p),
 A, B – stałe całkowania.

W przypadku, jeżeli V_m jest funkcją wszystkich trzech zmiennych przestrzennych (η, θ, ψ), szczególnym rozwiązaniem równania Laplace'a są równania:

$$\begin{aligned} V_m &= P_p^q(i \sinh \eta) P_p^q(\cos \theta) \sin q\psi \\ V_m &= Q_p^q(i \sinh \eta) Q_p^q(\cos \theta) \cos q\psi \end{aligned} \quad (4.13)$$

Jeżeli zagadnienie jest osiowo symetryczne, potencjał jest niezależny od zmiennej ψ , to równania (4.13) upraszczają się do równań:

$$\begin{aligned} V_m &= P_p(i \sinh \eta) P_p(\cos \theta) \\ V_m &= Q_p(i \sinh \eta) Q_p(\cos \theta) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Jeżeli potencjał V_m zależy tylko od współrzędnej η , równanie Laplace'a upraszcza się do wyrażenia:

$$\frac{d^2V_m}{d\eta^2} + \operatorname{tgh}\eta \frac{dV_m}{d\eta} = 0 \quad (4.15)$$

W przypadku modelowania ziarniaków istnieje symetria osiowa, zatem potencjał jest tylko funkcją współrzędnej η , równanie Laplace'a przyjmuje zatem postać (4.15), a jego rozwiązaniem ogólnym są równania [105, 131, 193]:

$$V_m = A + B \operatorname{arctg}(\sinh \eta) \quad (4.16)$$

lub

$$V_m = C + D \operatorname{arctg}(\sinh \eta) \quad (4.17)$$

w których

A, B, C, D – stałe całkowania.

4.1.2 Natężenie pola magnetycznego wokół namagnesowanej sferoidy spłaszczonej

W niniejszym rozdziale zostanie wyznaczone pole magnetyczne wokół namagnesowanej sferoidy spłaszczonej. Przyjęto, że sferoida znajduje się w jednorodnym polu magnetycznym. Rozmiary sferoidy są małe w porównaniu z gabarytami solenoidu, dlatego w dużej odległości od sferoidy pole pozostaje nie zniekształcone po jej wprowadzeniu. Potencjał jest funkcją jednej zmiennej η , rozwiązanie równania Laplace'a dla takiego przypadku ma postać (4.17). Przyjmuje się następujące warunki brzegowe [38, 40, 41, 169]:

$$\eta = \eta_0 \rightarrow V_m = V_{m_0},$$

$$\eta \rightarrow \infty \rightarrow V_m = 0.$$

Podstawiając powyższe warunki do równania (4.17), otrzymuje się stałe całkowania C i D

$$C = 0,$$

$$D = \frac{V_{m_0}}{\operatorname{arctg}(\sinh \eta_0)} \quad (4.18)$$

Funkcja rozkładu potencjału przybiera zatem postać:

$$V_m(\eta) = \frac{V_{m_0}}{\operatorname{arctg}(\sinh \eta_0)} \operatorname{arctg}(\sinh \eta). \quad (4.19)$$

Natężenie pola magnetycznego można obliczyć z zależności:

$$\mathbf{H} = -\nabla V_m \quad (4.20)$$

$$\mathbf{H} = -\frac{\mathbf{a}_\eta}{\sqrt{g_{11}}} \frac{dV_m}{d\eta} \quad (4.21)$$

$$\frac{dV_m}{d\eta} = \frac{V_{m_0}}{\operatorname{arctg}(\sinh \eta_0)} \frac{1}{\cosh \eta} \quad (4.22)$$

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{a}_\eta}{a\sqrt{\cosh^2 \eta - \sin^2 \theta}} \frac{V_{m_0}}{\operatorname{arctg}(\sinh \eta_0)} \frac{1}{\cosh \eta} \quad (4.23)$$

gdzie:

g_{11} – współczynnik metryki [105, 131, 193]:

$$g_{11} = a^2 \cosh^2 \eta - \sin^2 \theta,$$

\mathbf{a}_η – wektor jednostkowy w układzie sferoidy spłaszczonej.

4.1.3 Natężenie pola magnetycznego wewnątrz sferoidy spłaszczonej umieszczonej w jednorodnym polu magnetycznym

W celu wyznaczenia rozkładu pola magnetycznego wewnątrz sferoidy spłaszczonej, zakładając symetrię osiową, należy przyjąć następujące warunki brzegowe [169]:

$$\eta = \eta_0 \rightarrow V_m = 0,$$

$$\eta \rightarrow \infty \rightarrow V_m = H_0 z = H_0 a \sinh \eta \cos \theta$$

Rozwiązanie równania Laplace'a w analizowanym przypadku ma postać:

$$V_m(\eta) = H_0 \left\{ 1 - \frac{\sinh \eta_0}{\sinh \eta} \left[\frac{\sinh \eta \operatorname{arcctg}(\sinh \eta) - 1}{\sinh \eta_0 \operatorname{arcctg}(\sinh \eta_0) - 1} \right] \right\} \quad (4.24)$$

Do wyznaczenia natężenia pola, korzysta się z zależności (4.21) podanej w rozdziale (4.1.234)

$$\mathbf{H} = - \frac{\mathbf{a}_\eta}{\sqrt{g_{11}}} \frac{dV_m}{d\eta}$$

Ostatecznie otrzymuje się:

$$\mathbf{H} = H_0 \mathbf{a}_\eta \left[1 + \frac{\sinh \eta_0 \operatorname{arcctg}(\sinh \eta_0) - \operatorname{tgh}^2 \eta_0}{1 - \sinh \eta_0 \operatorname{arcctg}(\sinh \eta_0)} \right] \quad (4.25)$$

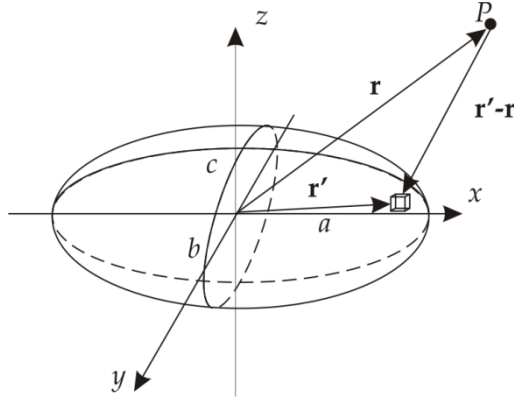
4.2 Sferoida spłaszczona w układzie współrzędnych kartezyjskich

Rozpatrując sferoidę z półosiami a, b, c która jest jednorodnie namagnesowana gęstością magnetycznego ładunku ρ_m (rys. 4.2), potencjał w dowolnym punkcie P można wyznaczyć przy pomocy wzoru [44, 172, 177]:

$$V_m(\mathbf{r}) = \frac{K \rho_m}{4\pi} \iiint \frac{dx' dy' dz'}{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|} \quad (4.24)$$

gdzie całkowaniu podlega cała objętość sferoidy, $\mathbf{r} = (x, y, z)$, $\mathbf{r}' = (x', y', z')$, oraz $\mathbf{r}' - \mathbf{r} = (x' - x, y' - y, z' - z)$. Definiując $\mathbf{r}' - \mathbf{r}$ przeciwnie do zazwyczaj używanej notacji, uzyskać można w twierdzeniu Gaussa wartość 4π dla punktów wewnętrznych

w stosunku do rozkładu potencjału powierzchniowego. Jeśli przyjąć zazwyczaj używaną konwencję: $\mathbf{r} - \mathbf{r}' = (x - x', y - y', z - z')$ wówczas $\mathbf{r} - \mathbf{r}'$ i \mathbf{n} , dodatnie jednostki normalne dla powierzchni sferoidy, utworzą kąt rozwarty przy \mathbf{r} znajdującym się w środku sferoidy, a z twierdzenia Gausa otrzymuje się -4π . Ta definicja nie zmienia wartości potencjału sferoidy, ponieważ w równaniu znajduje się tylko moduł $\mathbf{r} - \mathbf{r}'$. Współczynnik K we wzorze (4.24) wynosi 1 dla pola magnetycznego [183].



Rys. 4.2. Jednorodnie namagnesowana sferoida spłaszczona w układzie współrzędnych (x,y,z) [183]

Korzystając z następujących relacji zmiennych:

$$\left. \begin{aligned} x' &= aR\cos\theta \\ y' &= bR\sin\theta \cos\psi \\ z' &= cR\sin\theta \sin\psi \end{aligned} \right\} \quad (4.25)$$

(przy czym poszczególne zmienne zawierają się odpowiednio w przedziałach $0 \leq R \leq 1$, $0 \leq \theta \leq \pi$, $0 \leq \psi \leq 2\pi$), równanie (4.24) przyjmuje następującą postać:

$$V_m(r) = \frac{\rho_m abc}{4\pi} \int_0^1 \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \frac{R^2 \sin\theta \, dR \, d\theta \, d\psi}{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|} \quad (4.26)$$

Łatwo zauważyć, że przestrzeń wewnątrz i na zewnątrz sferoidy może być pokryta sferoidami współśrodkowymi z półosiami $a' = (a^2 - \lambda)^{1/2}$, $b' = (b^2 - \lambda)^{1/2}$, $c' = (c^2 - \lambda)^{1/2}$. Parametr λ zawiera się w przedziale $\lambda = [0; \infty)$ (dla $\lambda = 0$ sferoida początkowa, dla $\lambda \rightarrow \infty$ sferoida nieskończenie duża). Wyznaczając odchylenie (zmianę) potencjału $\delta(V_m)$, dla przypadku zmian półosi sferoidy, według przepisu: $\delta a^2 = \delta b^2 = \delta c^2 = \delta \lambda$, wówczas otrzymujemy [31, 32, 117, 183]:

$$\delta \left(\frac{V_m(r)}{abc} \right) = \frac{\rho_m}{4\pi} \int_0^1 \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \delta \left(\frac{1}{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|} \right) \cdot R^2 \sin\theta \, dR \, d\theta \, d\psi \quad (4.27)$$

Wykorzystując związek:

$$\delta \left(\frac{1}{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|} \right) = \frac{\delta \lambda}{2|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|^3} N \quad (4.28)$$

gdzie:

$$N = \frac{(x'-x)x'}{a^2} + \frac{(y'-y)y'}{b^2} + \frac{(z'-z)z'}{c^2} \quad (4.29)$$

oraz:

$$\frac{\delta x'}{x'} = \frac{\delta \lambda}{2a^2} \quad \frac{\delta y'}{y'} = \frac{\delta \lambda}{2b^2} \quad \frac{\delta z'}{z'} = \frac{\delta \lambda}{2c^2}$$

i podstawiając zależność (4.28) do (4.27), otrzymuje się ostatecznie:

$$\delta \left(\frac{V_m(r)}{abc} \right) = -\frac{\rho_m \delta \lambda}{8\pi} \int_0^1 \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \frac{N}{|r'-r|^3} \cdot R^2 \sin\theta \, dR \, d\theta \, d\psi \quad (4.30)$$

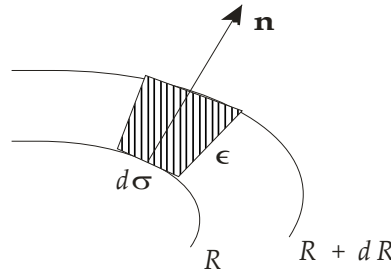
Rozwiązanie równania (4.30) wymaga wyznaczenia całki występującej w tym równaniu. Dla jej wyznaczenia, Autor za [183] przyjmuje następujący model:

Rozważa się dwie jednakowe sferoidy, przy czym jedną z nich opisuje równanie (4.31), otrzymane z wyrażenia (4.25):

$$\frac{x'^2}{a^2} + \frac{y'^2}{b^2} + \frac{z'^2}{c^2} = R^2 \quad (4.31)$$

drugą zaś równanie:

$$\frac{(x'+\alpha\epsilon)^2}{a^2} + \frac{(x'+\beta\epsilon)^2}{b^2} + \frac{(x'+\gamma\epsilon)^2}{c^2} = (R + dR)^2 \quad (4.32)$$



Rys. 4.3. Element powierzchni między dwoma sferoidami [183]

Opisaną sytuację przedstawia graficznie rys. 4.3. Przedstawiono na nim element powierzchni między dwiema sferoidami i oznaczono: $\mathbf{n} = (\alpha, \beta, \gamma)$ wektor jednostkowy normalny dla sferoidy wyrażonej równaniem (4.31), oraz ϵ jest odległością pomiędzy obiema sferoidami. Ignorując potęgi ϵ i dR większe niż pierwsze w równaniu (4.32), otrzymuje się:

$$\left. \begin{aligned} \alpha R dR &= \epsilon x' / a^2 \\ \beta R dR &= \epsilon y' / b^2 \\ \gamma R dR &= \epsilon z' / c^2 \end{aligned} \right\} \quad (4.33)$$

Jeśli $d\sigma$ jest elementem powierzchni sferoidy, można napisać, że element objętości jest równy:

$$abc R^2 \sin\theta \, dR \, d\theta \, d\psi = \epsilon d\sigma \quad (4.34)$$

Używając następnie definicji \mathbf{r}' oraz równań (4.29), (4.33) i (4.34), wyrażenie (4.30) przybiera następującą postać:

$$\delta \left(\frac{V_m(r)}{abc} \right) = -\frac{\rho_m \delta \lambda}{8\pi abc} \int_0^1 \left[\int_{elip} \frac{\cos(\mathbf{r}'-\mathbf{r}, \mathbf{n}) d\sigma}{|\mathbf{r}'-\mathbf{r}|^2} \right] R dR \quad (4.35)$$

Równanie (4.35) posłuży do wyznaczenia potencjału magnetycznego wewnątrz i na zewnątrz sferoidy opisanej równaniem (4.31).

1. Punkty wewnętrzne sferoidy:

Dla tego przypadku obowiązuje zmodyfikowana zależność (4.31):

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = R_1^2 < 1 \quad (4.36)$$

Dla sferoid $R > R_1$, po zastosowaniu twierdzenia Gaussa otrzymuje się:

$$\int_{elip(R)} \frac{\cos(\mathbf{r}'-\mathbf{r}, \mathbf{n}) d\sigma}{|\mathbf{r}'-\mathbf{r}|^2} = 4\pi \quad (4.37)$$

Jeśli $R < R_1$

$$\int_{elip(R)} \frac{\cos(\mathbf{r}'-\mathbf{r}, \mathbf{n}) d\sigma}{|\mathbf{r}'-\mathbf{r}|^2} = 0 \quad (4.38)$$

Wykorzystując zależności (4.35), (4.37) i (4.38) otrzymuje się:

$$\delta \left(\frac{V_m(r)}{abc} \right) = -\frac{\rho_m \delta \lambda}{4abc} \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} \right) \quad (4.39)$$

Zastępując a^2 , b^2 i c^2 odpowiednio przez $a^2 + \lambda$, $b^2 + \lambda$ i $c^2 + \lambda$ (w celu rozszerzenia wcześniejszego wyrażenia do wszystkich możliwych wartości półosi sferoidy), otrzymuje się:

$$\delta \left(\frac{V_m(r)}{D(\lambda)} \right) = -\frac{\rho_m \delta \lambda}{4D(\lambda)} \cdot \left(1 - \frac{x^2}{a^2+\lambda} - \frac{y^2}{b^2+\lambda} - \frac{z^2}{c^2+\lambda} \right) \quad (4.40)$$

przy czym:

$$D(\lambda) = [(a^2 + \lambda)(b^2 + \lambda)(c^2 + \lambda)]^{1/2} \quad (4.41)$$

Przyjmując warunek:

$$\left[\frac{V_m}{D} \right]_{\lambda=\infty} = 0 \quad (4.42)$$

określający ładunek jednorodnie namagnesowanej sferoidy wypełniającej całą przestrzeń, po całkowaniu dla parametru (λ) w zakresie od 0 do ∞ , można stwierdzić, że:

$$V_{m_w}(r)_{\lambda=0} = \frac{\rho_m abc}{4} \int_0^\infty \left(1 - \frac{x^2}{a^2+\lambda} - \frac{y^2}{b^2+\lambda} - \frac{z^2}{c^2+\lambda} \right) \frac{d\lambda}{D(\lambda)} \quad (4.43)$$

Jest to wyrażenie opisujące potencjał pochodzący od jednorodnie namagnesowanej sferoidy o półosiach a, b, c w dowolnym punkcie wewnątrz sferoidy.

2. Punkty zewnętrzne sferoidy:

Dla tego przypadku rozpatruje się sferoidy współogniskowe, dla których $\lambda = u$, powierzchnia ich zawiera punkt P . Dla sferoidy $0 \leq \lambda < u$, P jest punktem zewnętrznym. Stosując twierdzenie Gaussa do równania (4.35) otrzymuje się zależność:

$$\delta \left(\frac{V_m(r)}{abc} \right) = 0 \quad (4.44)$$

znaną jako twierdzenie Maclaurin'a. Dla sferoidy $u \leq \lambda \leq \infty$, P jest punktem wewnętrznym, dla którego jest obowiązujące równanie (4.40). Całkując w przedziale $[u ; \infty)$ i biorąc pod uwagę, że:

$$\left(\frac{V_m(r)}{D(\lambda)} \right)_u^\infty = - \left[\frac{V_m(r)}{D(\lambda)} \right]_{\lambda=0} \quad (4.45)$$

z uwzględnieniem zależności (4.42) i (4.44), otrzymuje się:

$$V_{m_z}(r) = \frac{\rho_m abc}{4} \int_u^\infty \left(1 - \frac{x^2}{a^2+\lambda} - \frac{y^2}{b^2+\lambda} - \frac{z^2}{c^2+\lambda} \right) \frac{d\lambda}{D(\lambda)} \quad (4.46)$$

Jest to wyrażenie opisujące potencjał magnetyczny wygenerowany przez jednorodnie namagnesowaną sferoidę z półosiami a, b, c w dowolnym zewnętrznym punkcie P .

Na powierzchni sferoidy ($u = 0$) równania (4.44) i (4.46) dają ten sam rezultat, ponadto zachodzą równości: $\nabla^2 V_{m_w}(r) = -\rho_m$ oraz $\nabla^2 V_{m_z}(r) = 0$.

Rozważając jednolicie namagnesowaną sferoidę, o dowolnym kierunku magnetyzacji $\mathbf{M} = (M_x, M_y, M_z)$, potencjał magnetostacyjny $V_m(r)$ wygenerowany przez tę sferoidę, w dowolnym punkcie w przestrzeni, może być wyliczony jako potencjał wytworzony od dwóch sferoid o przeciwnych kierunkach namagnesowania i odległości między nimi δr (δr jest równoległy do \mathbf{M}) tj.:

$$V'_m(r) = V_m(r - \delta r) - V_m(r) = -\delta r \cdot \nabla V_m(r) \quad (4.47)$$

Ponieważ

$$\nabla V_{m_w}(r) = -\frac{\rho_m abc}{2} \left[\mathbf{a}_x \int_0^\infty \frac{x}{(a^2+\lambda) D(\lambda)} d\lambda + \mathbf{a}_y \int_0^\infty \frac{y}{(b^2+\lambda) D(\lambda)} d\lambda + \mathbf{a}_z \int_0^\infty \frac{z}{(c^2+\lambda) D(\lambda)} d\lambda \right] \quad (4.48)$$

$$\nabla V_{m_z}(r) = -\frac{\rho_m abc}{2} \left[\mathbf{a}_x \int_u^\infty \frac{x}{(a^2+\lambda) D(\lambda)} d\lambda + \mathbf{a}_y \int_u^\infty \frac{y}{(b^2+\lambda) D(\lambda)} d\lambda + \mathbf{a}_z \int_u^\infty \frac{z}{(c^2+\lambda) D(\lambda)} d\lambda \right] \quad (4.49)$$

a także uwzględniając fakt, że wektor namagnesowania \mathbf{M} można zapisać jako zależność $\rho \delta r$, wówczas równanie (4.47) przybiera postać:

$$V'_{m_w,z}(r) = \frac{1}{2} abc \mathbf{M} (A_{w,z} x \mathbf{a}_x + B_{w,z} y \mathbf{a}_y + C_{w,z} z \mathbf{a}_z) \quad (4.50)$$

gdzie:

$$\left. \begin{aligned} A_{w,z} &= \int_{0,u}^{\infty} \frac{d\lambda}{(a^2+\lambda)D(\lambda)} \\ B_{w,z} &= \int_{0,u}^{\infty} \frac{d\lambda}{(b^2+\lambda)D(\lambda)} \\ C_{w,z} &= \int_{0,u}^{\infty} \frac{d\lambda}{(c^2+\lambda)D(\lambda)} \end{aligned} \right\} \quad (4.51)$$

Zależność (4.50) określa potencjał magnetostacyjny wytworzony przez namagnesowaną sferoidę w dowolnym punkcie P przestrzeni.

Pole magnetyczne w dowolnym punkcie przestrzeni P oblicza się z podstawowej zależności: $\mathbf{H}(\mathbf{r}) = -\nabla V'_{m_{w,z}}(\mathbf{r})$. Wykorzystując zależność (4.50), otrzymuje się:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(\mathbf{r}) &= -\nabla V'_{m_{w,z}}(\mathbf{r}) = \\ &= -\frac{1}{2}abc \left[\begin{aligned} &\left\{ A_{w,z}M_x - \left(\frac{xM_x}{(a^2+u)D(u)} + \frac{yM_y}{(b^2+u)D(u)} + \frac{zM_z}{(c^2+u)D(u)} \right) \frac{\partial u}{\partial x} \right\} \mathbf{a}_x \\ &+ \left\{ B_{w,z}M_y - \left(\frac{xM_x}{(a^2+u)D(u)} + \frac{yM_y}{(b^2+u)D(u)} + \frac{zM_z}{(c^2+u)D(u)} \right) \frac{\partial u}{\partial y} \right\} \mathbf{a}_y \\ &+ \left\{ C_{w,z}M_z - \left(\frac{xM_x}{(a^2+u)D(u)} + \frac{yM_y}{(b^2+u)D(u)} + \frac{zM_z}{(c^2+u)D(u)} \right) \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \mathbf{a}_z \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (4.52)$$

Obliczając pochodne cząstkowe z powierzchni sferoidy u opisanej wyrażeniem (4.53) względem poszczególnych współrzędnych, uzyskuje się:

$$\frac{x^2}{a^2+u} + \frac{y^2}{b^2+u} + \frac{z^2}{c^2+u} = 1 \quad (4.54)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= \frac{2x}{(a^2+u)} \left[\frac{x^2}{(a^2+u)^2} + \frac{y^2}{(b^2+u)^2} + \frac{z^2}{(c^2+u)^2} \right]^{-1} \\ \frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{2y}{(b^2+u)} \left[\frac{x^2}{(a^2+u)^2} + \frac{y^2}{(b^2+u)^2} + \frac{z^2}{(c^2+u)^2} \right]^{-1} \\ \frac{\partial u}{\partial z} &= \frac{2z}{(c^2+u)} \left[\frac{x^2}{(a^2+u)^2} + \frac{y^2}{(b^2+u)^2} + \frac{z^2}{(c^2+u)^2} \right]^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (4.55)$$

Rozwiązując całki $A_{w,z}$, $B_{w,z}$, $C_{w,z}$ określone zależnością (4.51) otrzymuje się:

$$\int_{0,u}^{\infty} \frac{d\lambda}{\sqrt{(a^2+\lambda)^3(b^2+\lambda)(c^2+\lambda)}} = \frac{2}{(a^2-c^2)^{1/2}(a^2-b^2)} [F(v, q) - E(v, q)] \quad (4.56)$$

$$\begin{aligned} \int_{0,u}^{\infty} \frac{d\lambda}{\sqrt{(a^2+\lambda)(b^2+\lambda)^3(c^2+\lambda)}} &= \frac{2(a^2-c^2)^{1/2}}{(a^2-b^2)(b^2-c^2)} E(v, q) - \frac{2}{(a^2-b^2)(a^2-c^2)^{1/2}} F(v, q) - \\ &\frac{2}{(b^2-c^2)} \left[\frac{u+c^2}{(u+a^2)(u+b^2)} \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (4.57)$$

$$\int_{0,u}^{\infty} \frac{d\lambda}{\sqrt{(a^2+\lambda)(b^2+\lambda)(c^2+\lambda)^3}} = \frac{2}{(a^2-c^2)^{1/2}(c^2-b^2)} E(v, q) + \frac{2}{(b^2-c^2)} \left[\frac{u+b^2}{(u+a^2)(u+c^2)} \right]^{1/2} \quad (4.58)$$

gdzie:

$$v = \arcsin \left[\frac{a^2 - c^2}{a^2 + u} \right]^{1/2}, \quad q = \left[\frac{a^2 - b^2}{a^2 - c^2} \right]^{1/2},$$

$F(v,q)$, $E(v,q)$ całki eliptyczne niezupełne pierwszego i drugiego rodzaju [31, 32, 117].

4.2.1 Zewnętrzne pole magnetyczne pochodzące od jednorodnie namagnesowanej sferoidy spłaszczonej

Korzystając z obliczonych wcześniej zależności, można określić zewnętrzne pole magnetyczne pochodzące od jednorodnie namagnesowanej sferoidy spłaszczonej. Obliczenia te wykonano dla dwóch przypadków: sferoida spłaszczona namagnesowana wzdłuż krótszej osi oraz sferoida spłaszczona namagnesowana wzdłuż dłuższej osi.

a) Sferoida spłaszczona, jednorodnie namagnesowana wzdłuż krótszej osi

Potencjał magnetyczny pochodzący od jednorodnie namagnesowanej sferoidy wzdłuż krótszej osi wyznacza się z zależności [183]:

$$V'_m(r) = -M_z \frac{ca^2}{f^2} \xi (\zeta \operatorname{ctg}^{-1} \zeta - 1) \quad (4.59)$$

gdzie:

$$f = (a^2 - c^2)^{\frac{1}{2}},$$

$$\zeta = \left(\frac{1}{2} \left[(x^2 + y^2 + z^2 - 1) + \{ (x^2 + y^2 + z^2 - 1)^2 + 4z^2 \}^{\frac{1}{2}} \right] \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$\xi = z/\zeta,$$

$$\theta = \arctan y/z.$$

Poszczególne składowe natężenia pola mają postać:

$$\left. \begin{aligned} \frac{H_x(r)}{M_z a^2 c f^{-3}} &= \frac{\xi(1-\xi)^{\frac{1}{2}}}{(\zeta^2 - \xi^2)(1-\zeta)^{\frac{1}{2}}} \cos \theta \\ \frac{H_y(r)}{M_z a^2 c f^{-3}} &= \frac{\xi(1-\xi)^{\frac{1}{2}}}{(\zeta^2 - \xi^2)(1-\zeta)^{\frac{1}{2}}} \sin \theta \\ \frac{H_z(r)}{M_z a^2 c f^{-3}} &= \operatorname{ctg}^{-1} \zeta - \frac{\zeta}{\zeta^2 + \xi^2} \end{aligned} \right\} \quad (4.60)$$

b) Sferoida spłaszczona, jednorodnie namagnesowana wzdłuż dłuższej osi

Dla aktualnie rozpatrywanego przypadku zależność opisująca potencjał przybiera postać [183]:

$$V'_m(r) = -\frac{M_x ca^2}{2f^2} (1 - \xi^2)^{\frac{1}{2}} (1 + \zeta^2)^{\frac{1}{2}} \left(\text{ctg}^{-1} \zeta - \frac{\zeta}{1 + \xi^2} \right) \cos \theta \quad (4.61)$$

gdzie:

$$f = (a^2 - c^2)^{\frac{1}{2}},$$

$$\zeta = \left(\frac{1}{2} \left[(x^2 + y^2 + z^2 - 1) + \{(x^2 + y^2 + z^2 - 1)^2 + 4z^2\}^{\frac{1}{2}} \right] \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$\xi = z/\zeta,$$

$$\theta = \arctan y/z.$$

Poszczególne składowe natężenia pola mają postać:

$$\left. \begin{aligned} \frac{H_x(r)}{M_x a^2 c f^{-3}} &= - \left\{ \frac{1}{2} \left(\text{ctg}^{-1} \zeta - \frac{\zeta}{1 + \zeta^2} \right) + \frac{\zeta(1 - \xi^2)}{(\zeta^2 + \xi^2)(1 + \zeta^2)} \cos^2 \theta \right\} \\ \frac{H_y(r)}{M_x a^2 c f^{-3}} &= \frac{\zeta(1 - \xi^2)}{(\zeta^2 + \xi^2)(1 + \zeta^2)} \cos \theta \sin \theta \\ \frac{H_z(r)}{M_x a^2 c f^{-3}} &= \frac{\xi(1 - \xi^2)^{\frac{1}{2}}}{(\zeta^2 + \xi^2)(1 + \zeta^2)^{\frac{1}{2}}} \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (4.62)$$

4.2.2 Natężenie pola magnetycznego wewnątrz sferoidy spłaszczonej umieszczonej w jednorodnym polu magnetycznym

Pole magnetyczne w sferoidzie, umieszczonej w jednorodnym polu, będzie również jednorodne i równoległe do pola zewnętrznego niezależnie od orientacji osi [101, 177].

Potencjał wewnątrz sferoidy dla przypadków zewnętrznego pola ukierunkowanego wzdłuż krótszej oraz dłuższej osi sferoidy można obliczyć za pomocą zależności:

$$V'_m(r) = -\frac{H_{0x}x}{1 + \frac{abc}{2\mu_2}(\mu_1 - \mu_2)A_1} - \frac{H_{0y}y}{1 + \frac{abc}{2\mu_2}(\mu_1 - \mu_2)A_2} - \frac{H_{0z}z}{1 + \frac{abc}{2\mu_2}(\mu_1 - \mu_2)A_3} \quad (4.63)$$

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:

$$\left. \begin{aligned} H_x(r) &= \frac{H_{0x}}{1 + \frac{abc}{2\mu_2}(\mu_1 - \mu_2)A_1} \\ H_y(r) &= \frac{H_{0y}}{1 + \frac{abc}{2\mu_2}(\mu_1 - \mu_2)A_2} \\ H_z(r) &= \frac{H_{0z}}{1 + \frac{abc}{2\mu_2}(\mu_1 - \mu_2)A_3} \end{aligned} \right\} \quad (4.64)$$

gdzie:

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

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

A_1, A_2, A_3 – zależności określone w równaniu (4.63).

4.3 Numeryczna analiza rozkładu pola magnetycznego

4.3.1 Założenia upraszczające obliczenia

W oparciu o rozważania przedstawione w rozdziałach 2 i 3, ziarniaki i nasiona roślin można przedstawić jako jednowarstwową paramagnetyczną sferoidę spłaszczoną, umieszczoną w jednorodnym polu magnetycznym.

Przyjmuje się następujące założenia co do właściwości środowisk:

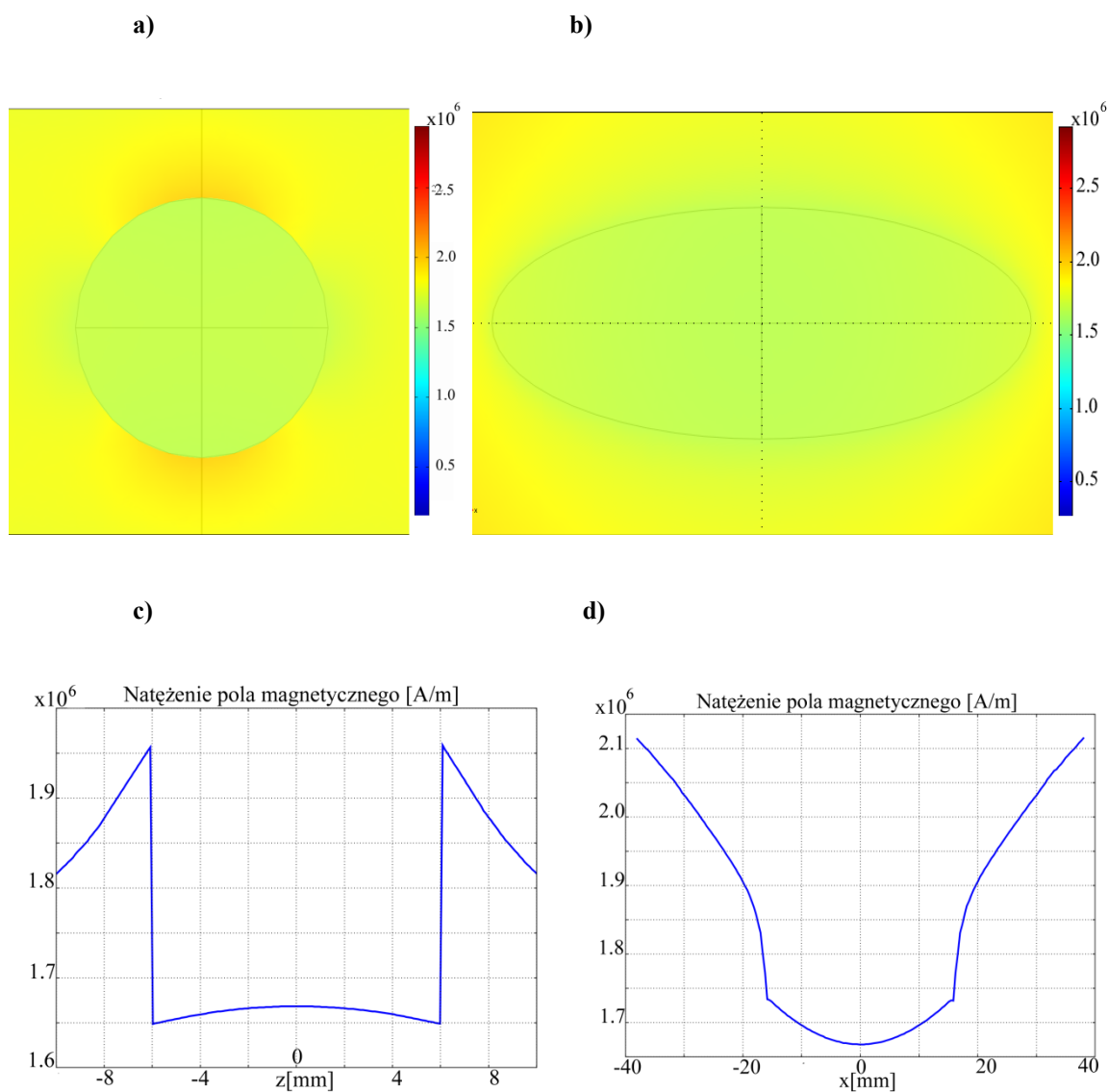
- sferoida oraz środowisko otaczające (powietrze) jest izotropowe oraz liniowe,
- zmiany właściwości środowisk na granicach są skokowe.

Analizę rozkładu pola magnetycznego sferoidy spłaszczonej umieszczonej w jednorodnym polu magnetycznym przeprowadzono dla dwóch przypadków: pole magnetyczne spolaryzowane wzdłuż krótszej oraz dłuższej osi sferoidy. Sferoida jest paramagnetykiem o przenikalności magnetycznej $\mu_r = 1,1$.

4.3.2 Rozkład natężenia pola magnetycznego dla sferoidy spłaszczonej umieszczonej w jednorodnym polu

Obliczenia wykonano z wykorzystaniem programu COMSOL Multiphysics.

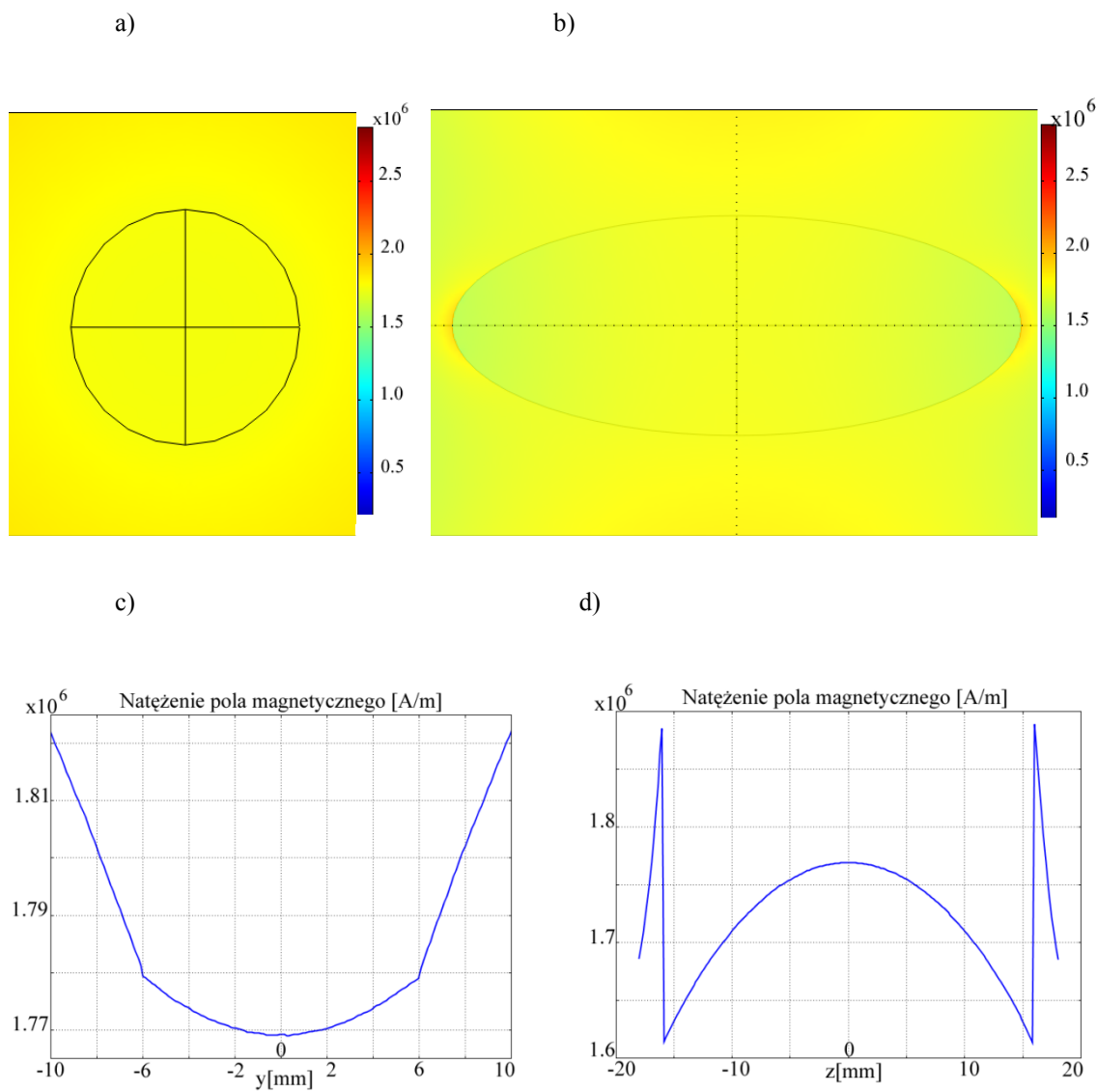
a) **Sferoida spłaszczona umieszczona w jednorodnym polu magnetycznym spolaryzowanym wzdłuż krótszej osi sferoidy**



Rys. 4.4. 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 $-33 < x < 33$

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



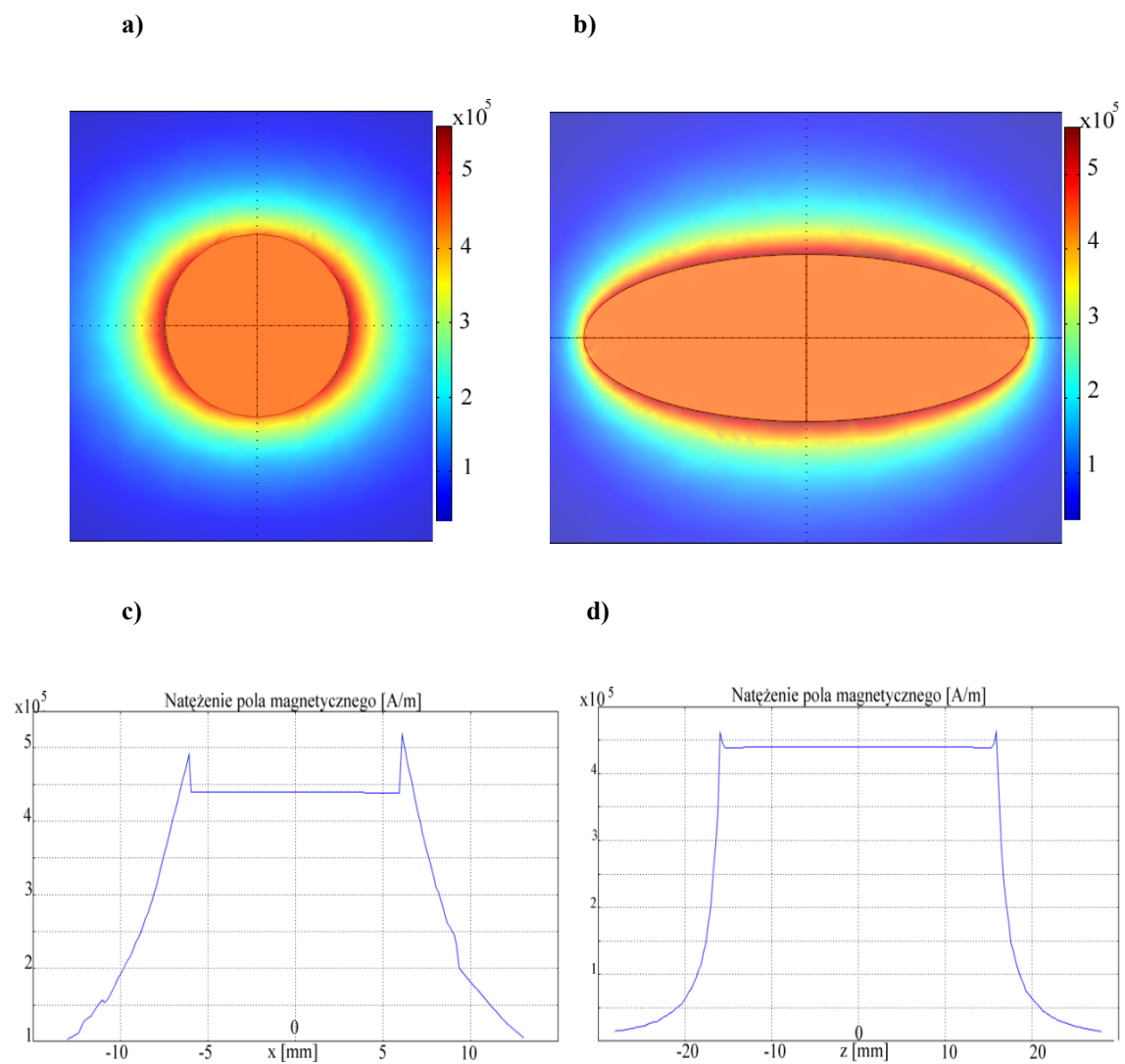
Rys. 4.5. Rozkłady natężenia pola magnetycznego dla: a) płaszczyzny $z = 0$, b) płaszczyzny $y = 0$.

Wykresy natężenia pola magnetycznego dla: c) $x = 0$, $z = 0$ oraz $-10 < y < 10$, d) $x = 0$, $y = 0$ oraz $-18 < z < 18$

4.3.3 Rozkład natężenia pola magnetycznego dla jednorodnie namagnesowanej sferoidy spłaszczonej

Według reprezentowanego modelu teoretycznego przedstawionego w poprzednich podrozdziałach, dokonano symulacji rozkładu pola magnetycznego namagnesowanej sferoidy spłaszczonej dla dwóch przypadków: sferoida namagnesowana wzdłuż krótszej i dłuższej osi.

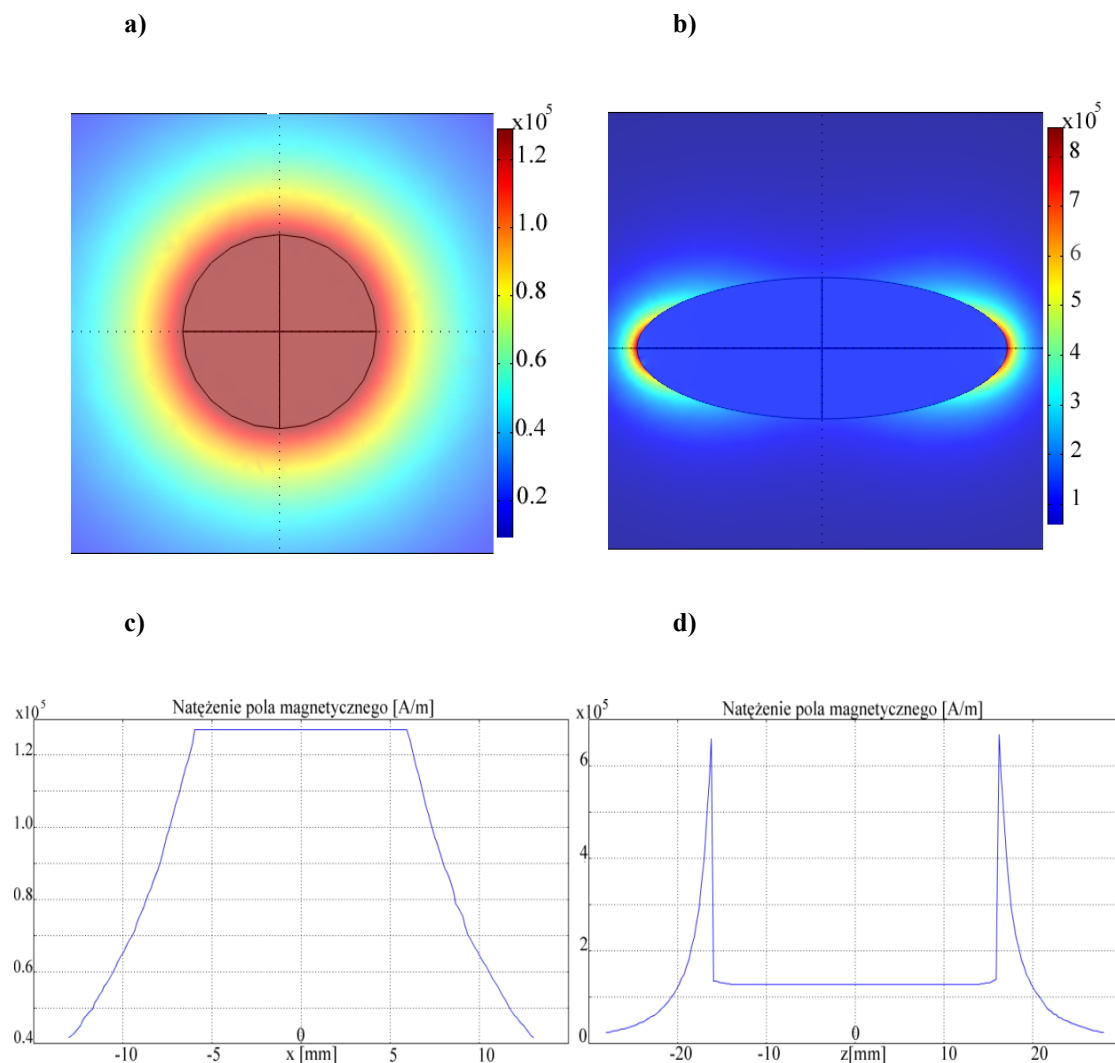
a) Sferoida spłaszczona jednorodnie namagnesowana wzdłuż krótszej osi



Rys. 4.6. Rozkłady natężenia pola magnetycznego dla przekroju: a) płaszczyzny $z = 0$
b) płaszczyzny $y = 0$.

Wykresy natężenia pola magnetycznego dla: c) $y = 0, z = 0$ oraz $-13 < x < 13$
d) $x = 0, y = 0$ oraz $-28 < z < 28$

b) Sferoida spłaszczona jednorodnie namagnesowana wzdłuż dłuższej osi



Rys. 4.7. Rozkłady natężenia pola magnetycznego dla: a) płaszczyzny $z = 0$, b) płaszczyzny $y = 0$.

Wykresy natężenia pola magnetycznego dla: c) $y = 0, z = 0$ oraz $-13 < x < 13$, d) $x = 0, y = 0$ oraz $-28 < z < 28$

4.3.4 Wnioski z analizy numerycznej rozkładu pola magnetycznego

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.

Rozdział 5

Urządzenia wzbudzające pole magnetyczne przydatne w biostymulacji organizmów żywych

Autor przeprowadził badania eksperymentalne wpływu pola magnetycznego na ziarniaki pszenicy oraz nasiona lnianki. Stosował w badaniach pola stałe w czasie oraz wolnozmiennie o częstotliwości 50 Hz. Wykorzystał kilka rodzajów urządzeń wzbudzających te pola.

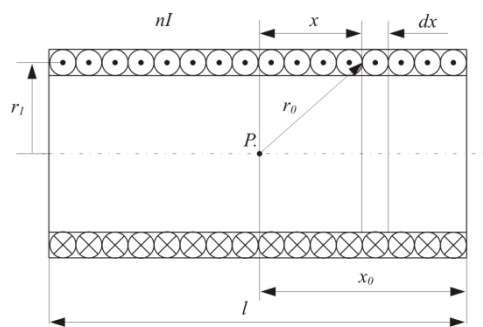
W szczególności:

- w doświadczeniu wstępnym wykorzystano pole magnetyczne wzbudzone przez elektromagnes nadprzewodnikowy firmy Oxford Instruments,
- przedsięwziętą biostymulację zmiennym polem magnetycznym przeprowadzono z wykorzystaniem cewki indukcyjnej z uzwojeniem klasycznym,
- w kolejnym eksperymencie wykorzystano pole magnetyczne wytworzone przez magnesy trwałe oraz elektromagnes nadprzewodnikowy firmy Sumitomo Electric Industries, Ltd.

5.1 Biostymulacja polem magnetycznym wzbudzonym cewką z uzwojeniem klasycznym

Na rysunku 5.1 przedstawiono solenoid jednowarstwowy, nawinięty cienkim przewodem. Natężenie pola magnetycznego w osi solenoidu można obliczyć korzystając z prawa Biota–Savarta [104, 168]:

$$d\mathbf{H} = \frac{I(d\mathbf{l} \times \mathbf{a}_r)}{4\pi r^2} \quad (5.1)$$



Rys. 5.1. Cewka klasyczna, solenoid jednowarstwowy, nieskończenie długi

Natężenie pola w punkcie P na osi solenoidu wyraża się zależnością:

$$H = \frac{nI r_1^2}{2l} \int_{l-x_0}^{x_0} \frac{dx}{(r_1^2 + x^2)^{3/2}} = \frac{nI}{2l} \left(\frac{x_0}{\sqrt{r_1^2 + x_0^2}} + \frac{x_0}{\sqrt{r_1^2 + (l-x_0)^2}} \right) \quad (5.2)$$

gdzie:

n – liczba zwojów solenoidu,

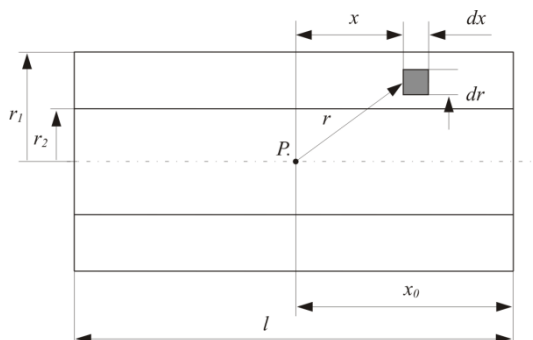
I – prąd w pojedynczym zwoju,

l – długość solenoidu,

r_1 – promień solenoidu,

$\frac{nI}{l}$ – prąd w elementarnym zastępczym zwoju o grubości dx .

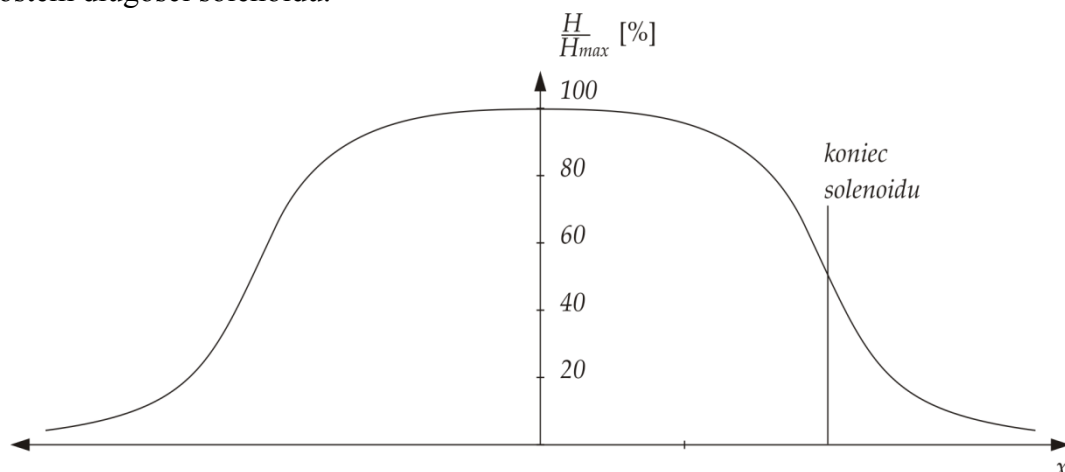
Aby uzyskać odpowiednio wysokie natężenie pola magnetycznego istnieje konieczność nawinięcia dużej ilości warstw uzwojeń. Rysunek 5.2 przedstawia solenoid o skończonej grubości.



Rys. 5.2. Solenoid z uzwojeniem o skończonym przekroju
 Natężenie pola w osi solenoidu z rys. 5.2 jest wyrażone wzorem [168]:

$$H = \frac{nl}{2l(r_1-r_2)} \int_{r_1}^{r_2} \left(\frac{x_0}{\sqrt{r^2+x_0^2}} + \frac{l-a}{\sqrt{r^2+(l-x_0)^2}} \right) dr \quad (5.3)$$

Rysunek 5.3 przedstawia względne wartości natężenia pola wzdłuż osi solenoidu dla wartości ilorazu długości i promienia jeden do czterech cewki. Widać z niego, że dla solenoidów odpowiednio długich, istnieje obszar w pobliżu środka długości cewki, w którym natężenie pola wzdłuż osi jest jednorodne. Obszar ten wzrasta wraz ze wzrostem długości solenoidu.

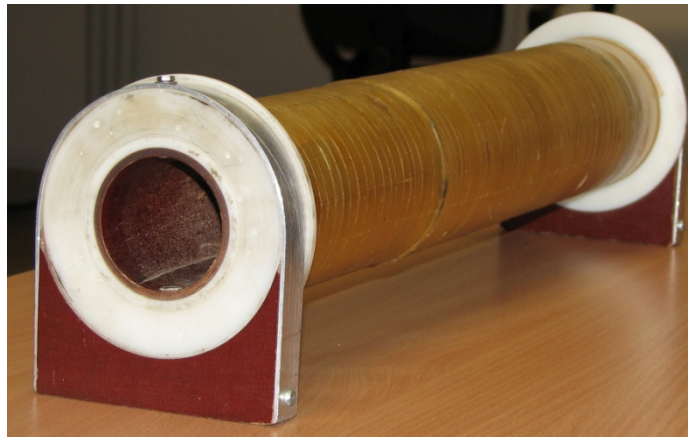


Rys. 5.3. Rozkłady natężenia pola w cewce dla różnych ilorazów długości i promienia cewki [110]

We wszystkich przypadkach traktowano przygotowane próbki ziarniaków i nasion jednorodnym polem magnetycznym. Wybierano zatem taki obszar przestrzeni elektromagnesów, w której ten warunek jest spełniony. Klasycznym uzwojeniem elektromagnesu, wykorzystywanym także w doświadczeniu Autora jest solenoid. Jest to uzwojenie osiowo-symetryczne, w którym rozkład pola magnetycznego może być w znacznej przestrzeni równomierny.

W jednym z przeprowadzonych eksperymentów, badano wpływ wolnozmiennego pola magnetycznego o częstotliwości 50 Hz, na przygotowane próbki ziarniaków. Zmienne pole magnetyczne wytworzono za pomocą solenoidu, przedstawionego na rysunku 5.4.

a)



b)



Rys. 5.4. Zdjęcia solenoidu użytego do stymulacji ziarniaków polem magnetycznym

Powyższe urządzenie zasilono za pomocą autotransformatora, dzięki temu uzyskano możliwość płynnej regulacji indukcji elektromagnetycznej w rdzeniu solenoidu.

5.2 Biostymulacja polem magnetycznym wzbudzonym elektromagnesem nadprzewodnikowym

Nadprzewodnictwo odkryte w 1911 r. przez Kamerlinga Onnesa, ma wielorakie zastosowania. Jednym z nich jest wzbudzanie silnych pól magnetycznych. Pola te znalazły zastosowanie w separacji magnetycznej, rezonansie magnetycznym itp. Pola magnetyczne wytworzone przez elektromagnesy nadprzewodzące mogą znaleźć zastosowanie również do biostymulacji [34, 35, 43, 170, 171].

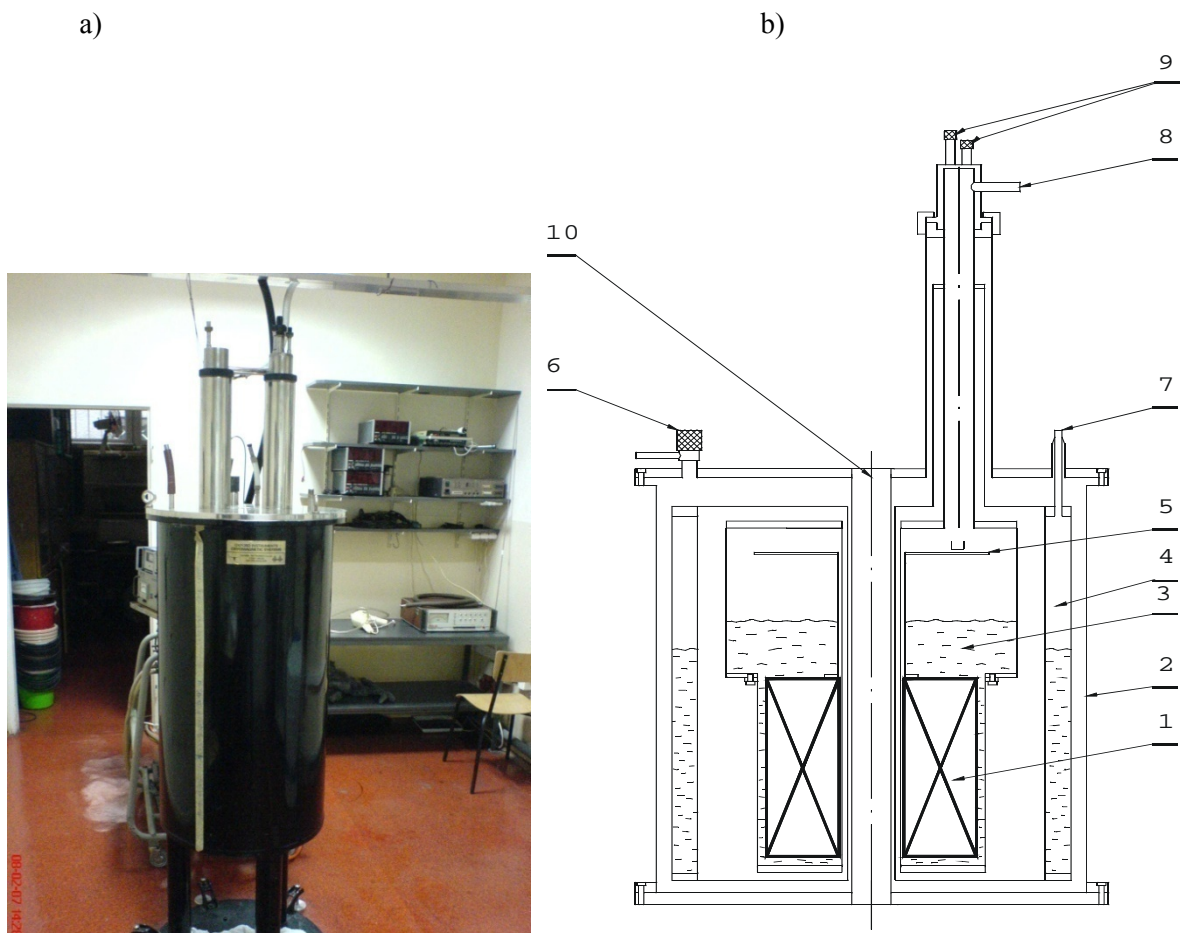
5.2.1 Elektromagnes nadprzewodnikowy firmy Oxford Instruments

Poniżej jest przedstawiony elektromagnes nadprzewodnikowy w którym pole magnetyczne – dostępne w temperaturze otoczenia – może osiągnąć wartość do 6,0 [T].

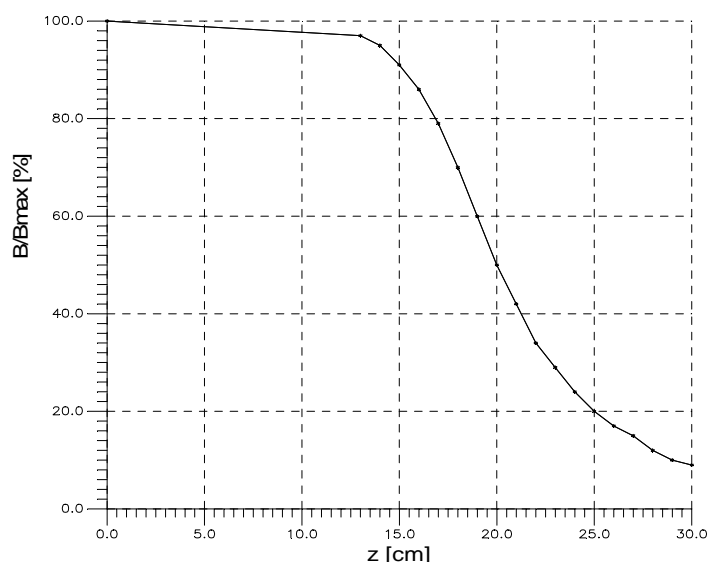
Ogólna charakterystyka elektromagnesu:

- maksymalna wartość indukcji magnetycznej: $B_0 = 6,0$ [T]
- prąd zasilania (dla uzyskania indukcji maksymalnej): $I_{zas} = 27,7$ [A]
- indukcyjność uzwojenia: 130 [H]
- średnica przelotowego kanału kriostatu: 54 [mm]

Jest to urządzenie skonstruowane w kształcie walca z cylindrycznym otworem przelotowym usytuowanym pionowo. Kriostat wykonany jest ze stopu aluminium, jest naczyniem dwuściennym, między jego ścianami utrzymywana jest próżnia o ciśnieniu 10^{-3} [Pa]. W przestrzeni tej znajduje się zbiornik azotu połączony z ekranem azotowym. Koncentrycznie w stosunku do zbiornika azotowego jest umieszczony zbiornik ciekłego helu, w którym znajduje się uzwojenie nadprzewodnikowe.



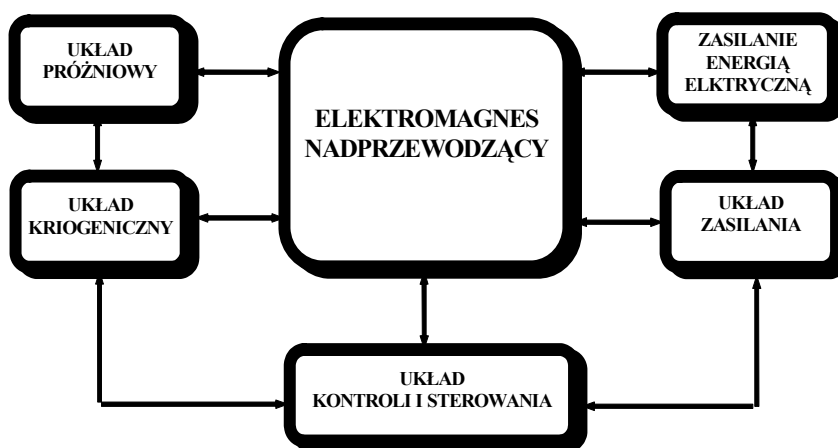
Rys. 5.5. a) zdjęcie, b) schemat elektromagnesu nadprzewodnikowego użytego do badań: 1 - uzwojenie magnesu nadprzewodnikowego, 2 - kriostat, 3 - ciekły hel, 4 - naczynie azotowe, 5 - płyta przyłączeniowa, 6 - zawór próżniowy, 7 - wlew ciekłego azotu, 8 - wylot helu gazowego, 9 - króćce wylotowe ciekłego helu, 10 - kanał magnesu



Rys. 5.6. Rozkład względnej wartości indukcji magnetycznej w osi kanału elektromagnesu

Na rysunku 5.6 przedstawiono pomierzony rozkład względnej wartości indukcji pola magnetycznego w kanale elektromagnesu. Widać, że rozkład ten (składowa indukcji wzdłuż osi z uzwojenia) jest bardzo korzystny z punktu widzenia prowadzenia badań nad biostymulacją. Zatem cały obszar, w którym zachodzi proces biostymulacji jest praktycznie w jednorodnym polu magnetycznym (próbki znajdują się w polu, którego wartość wynosi ok. 95 % B_{max}).

Elektromagnes z uzwojeniem nadprzewodnikowym należy wyposażyć w instalację, które muszą uwzględniać wymagania techniki kriogenicznej, próżniowej oraz charakterystyczne stany pracy elektromagnesu, a mianowicie: schładzanie kriostatu i uzwojenia, zasilanie uzwojenia, pracę normalną, stany awaryjne. Rysunek 5.7 przedstawia schemat blokowy systemu umożliwiającego badanie i eksploatację elektromagnesu [37].



Rys. 5.7. Funkcjonalne powiązanie układów współpracujących z elektromagnesem nadprzewodnikowym

Podstawową zaletą układu badawczego z elektromagnesem nadprzewodnikowym jest jednorodność pola, a także możliwość płynnej regulacji wartości tegoż pola.

5.2.2 Elektromagnes nadprzewodnikowy firmy Sumitomo Electric Industries, Ltd.

Elektromagnes nadprzewodnikowy, pokazany na rysunku 5.8, umożliwia dostęp do pola magnetycznego w temperaturze otoczenia. Jest on wykorzystany jako źródło pola magnetycznego o indukcji do 10 T. Uzwojenie nadprzewodnikowe chłodzone jest metodą kontaktową przy pomocy mikrochłodziarki. Po uzyskaniu stanu nadprzewodnictwa i zasileniu uzwojenia prądem, pole magnetyczne może być wzbudzone przez kilka tysięcy godzin. Obsługa elektromagnesu jest prosta i nie wymaga szczególnie skomplikowanej infrastruktury.

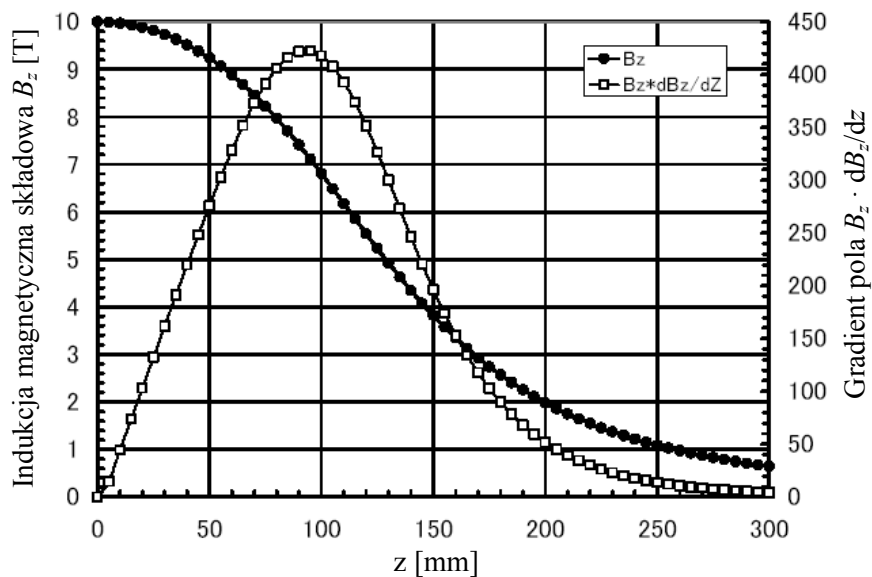


Rys. 5.8. Widok elektromagnesu nadprzewodnikowego model HF10-100VHT-B, będącego źródłem pola magnetycznego

Ogólna charakterystyka elektromagnesu [50]:

- indukcja w centrum kanału: 0 – 10 T
- czas zasilania (0 T do 10 T): ok. 10 min.
- zewnętrzna średnica magnesu: 600 mm
- średnica kanału: 100 mm

Na rysunku 5.9 przedstawiono rozkład wartości indukcji pola magnetycznego w kanale elektromagnesu.



Rys. 5.9. Rozkład indukcji pola magnetycznego (składowa B_z) w kanale elektromagnesu

5.3 Biostymulacja polem magnetycznym wzbudzonym magnesami trwałymi

Magnes trwały jest ciałem ferromagnetycznym będącym źródłem stałego dwubiegunowego pola magnetycznego. Magnesy trwałe dzieli się na:

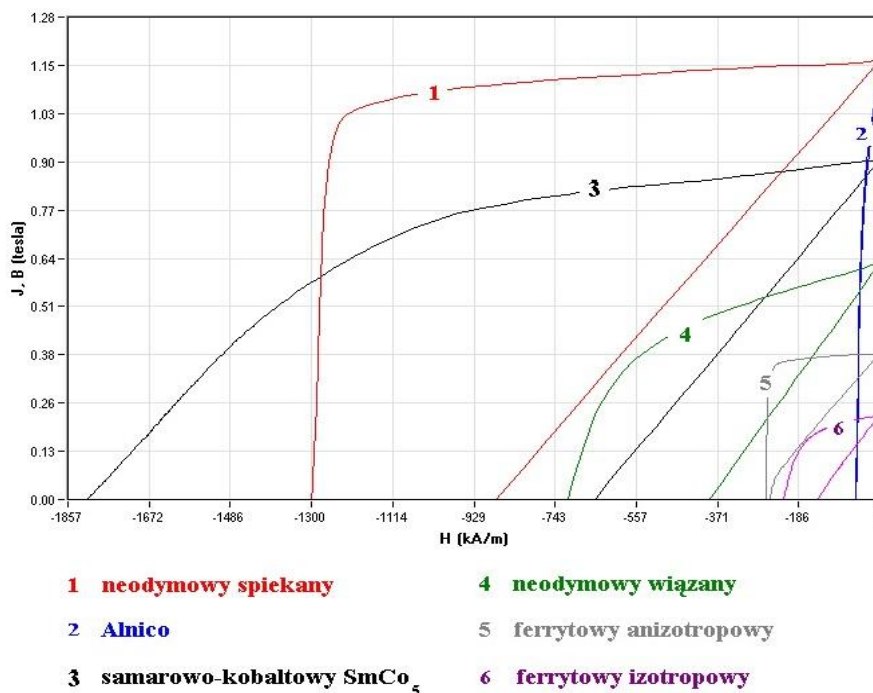
- trwałe (bryły ciał stałych wykazujących własności ferromagnetyczne, ferryty),
- proszkowe (wykonane z materiałów sypkich, rozdrobnionych magnesów trwałych) [204].

Parametry użytkowe magnesów trwałych zależą od właściwości magnetycznych materiału z jakiego jest wykonany magnes, a także od kształtu, który ma wpływ na kształt linii sił pola wokół magnesu jak również od wielkości magnesu. Do parametrów użytkowych należy zaliczyć m.in. kształt i zasięg linii sił pola magnetycznego a także natężenie pola w konkretnym punkcie na powierzchni magnesu lub w zadanym punkcie w przestrzeni wokół magnesu, udźwig, strumień czy też moment magnetyczny. Każdy magnes posiada określony kierunek magnesowania.

Przykładowe rodzaje magnesów:

- samarowo-kobaltowe – (SmCo_5) jest związkami samaru i kobaltu,
- neodymowe – (spiekane i wiązane) oparte na związkach neodymu,
- ceramiczne – ceramiczne spieki tlenków żelaza,
- plastyczne – magnesy niemetaliczne, zbudowane z polimerów zawierających nikiel,
- alnico – wykonane ze związków glinu (Al) niklu (Ni) i kobaltu (Co) (Al-Ni-Co).

Na rysunku 5.10 zestawiono charakterystyki magnetyczne najpopularniejszych magnesów trwałych.



Rys. 5.10. Wykres charakterystyk magnetycznych najpopularniejszych magnesów [204]

Zaletami układu badawczego z magnesami trwałymi są niskie koszty jego wykonania a także wysoka wartość pola magnetycznego. Do wad należy zaliczyć brak jednorodności pola w większych odległościach oraz regulacji wartości pola magnetycznego.



Rys. 5.11. Magnes neodymowy typu MPŁ 25 x 10 x 5 / N38, wykorzystany w badaniach eksperymentalnych

Obecnie do najbardziej popularnych należą magnesy neodymowe. Są one wytwarzane metodami metalurgii proszków, a dzięki prasowaniu w polu magnetycznym oraz obróbce plastycznej w podwyższonej temperaturze uzyskują strukturę anizotropową. Magnesy spiekane posiadają także duże wartości remanencji B_r , podobne jak dla magnesów alnico, jednak ich pola koercji jH_c są kilkudziesięciokrotnie wyższe, co umożliwia pracę w obecności silnych pól odmagnesowujących.

Najważniejsze zalety, które posiada spiekany magnes neodymowy to: ekstremalnie duże maksymalne gęstości energii $(BH)_{max}$, bardzo duże wartości koercji jH_c oraz duże wartości remanencji B_r . Sprzyja to stosowaniu tych magnesów tam, gdzie wymagana jest duża miniaturyzacja. Podstawowe zastosowania spiekanych magnesów Nd-Fe-B to: silniki, prądnice, urządzenia elektroniczne (głośniki, mikrofony, alarmy itp.), zabawki mechaniczne, separatory, serwomotory, siłowniki, uchwyty i wiele innych urządzeń, w których wymagana jest obecność silnego pola magnetycznego w zakresie niezbyt wysokich temperatur [204].

Rozdział 6

Badania eksperymentalne

Wpływ pola magnetycznego na organizmy żywe w tym na kiełkowanie nasion i wzrost roślin, był znany już w XIX wieku, jednak badania nad tym zjawiskiem nie zostały podjęte. Gwałtowny wzrost zainteresowania wpływem i wykorzystaniem pola magnetycznego do biostymulacji rozwinął się w drugiej połowie XX wieku. Problem pojawił się przy porównywaniu poszczególnych wyników badań, ponieważ używano różnej metodyki badawczej, jak również różnych wielkości do opisywania pola magnetycznego.

Z przeprowadzonych badań literaturowych (prezentowanych w rozdziale 1) wynika, że istnieją dwa podstawowe parametry, które mogą oddziaływać na nasiona i rośliny. Są nimi: gęstość energii pola magnetycznego i czas ekspozycji. Wielkość, która charakteryzuje wpływ pola magnetycznego na organizmy żywe, nazywa się dawką ekspozycyjną D . Jest ona iloczynem wspomnianych parametrów [121].

$$D = \rho_{em} t_e \quad (6.1)$$

gdzie:

ρ_{em} – gęstość energii pola magnetycznego [Jm^{-3}],

t_e – czas ekspozycji [s].

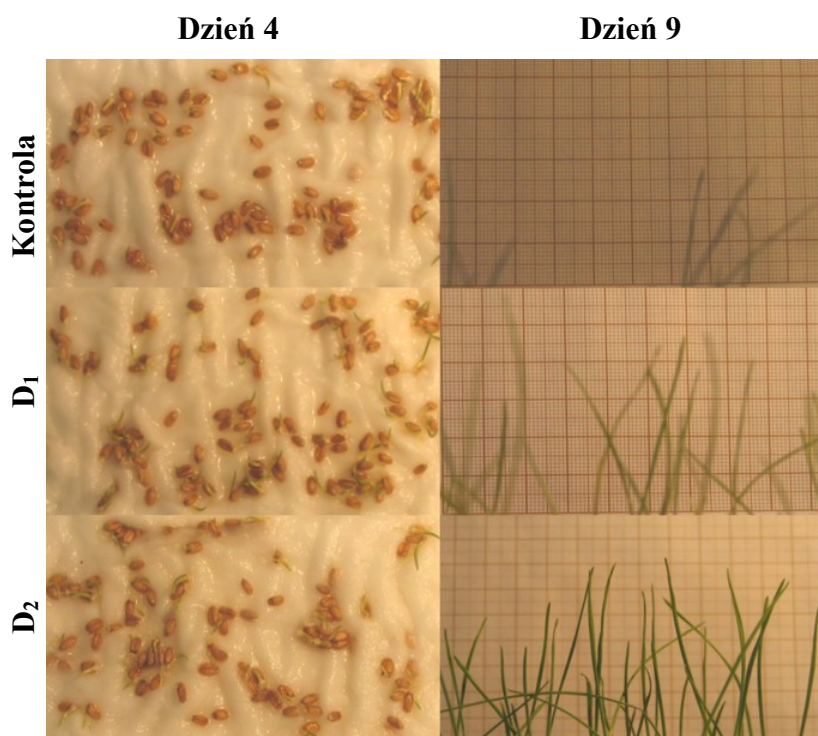
Średnią gęstość energii pola magnetycznego można przedstawić jako [122]:

$$\rho_{em} = \frac{1}{2} \mu_0 H_m^2 = \frac{1}{2\mu_0} B_m^2 \quad (6.2)$$

6.1 Badania wstępne

Doświadczenie pierwsze obejmowało badania wstępne, które polegały na przedsięwziętej biostymulacji ziarniaków pszenicy. Celem badań było wizualne zaobserwowanie wpływu stałego pola magnetycznego. Ziarniaki pszenicy umieszczono w stałym polu magnetycznym o wartości 925 [mT]. Pole zostało wygenerowane magnesem nadprzewodnikowym firmy Oxford Instruments. Ze względu na bardzo silne pole, zastosowane zostały krótkie czasy ekspozycji, $t_1 = 8$ [s] oraz $t_2 = 20$ [s]. Dawka ekspozycyjna wynosiła zatem odpowiednio:

$$D_1 = 5,45 \cdot 10^6 \text{ [Jm}^{-3}\text{s]} \text{ oraz } D_2 = 13,62 \cdot 10^6 \text{ [Jm}^{-3}\text{s]}.$$



Rys. 6.1. Fotografie przedstawiające wyniki badań wstępnych dla prób ziarniaków poddanych działaniu pola magnetycznego o dawkach ekspozycyjnych $D_1 = 5,45 \cdot 10^6 \text{ [Jm}^{-3}\text{s]}$ i $D_2 = 13,62 \cdot 10^6 \text{ [Jm}^{-3}\text{s]}$ oraz kontroli w czwartym i dziewiątym dniu obserwacji

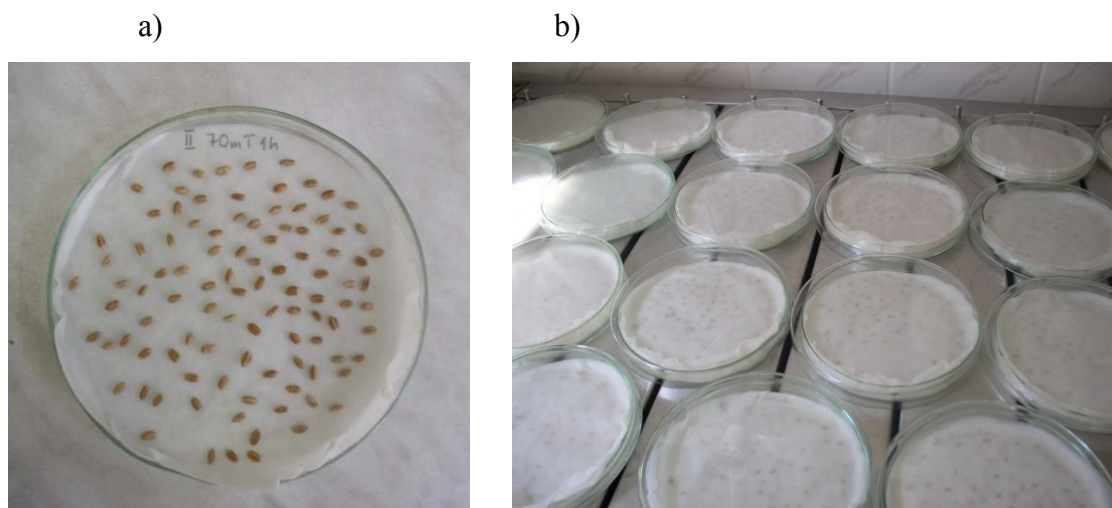
Wyniki badań wstępnych były bardzo obiecujące. Na zdjęciach zrobionych czwartego dnia po wysiewie (rys. 6.1), widać, że ziarniaków nie stymulowanych (próby kontrolnej) wykiełkowało mniej niż ziarniaków stymulowanych polem magnetycznym. Kiełki ziarniaków stymulowanych są dłuższe, lepiej wykształcone. Między ziarniakami stymulowanymi dawką D_1 i D_2 nie zaobserwowano większej różnicy. Zdjęcia 9 dnia po wysiewie przedstawiają liście siewek uzyskane z ziarniaków stymulowanych polem magnetycznym o dawce D_2 , które są dłuższe i jest ich więcej niż stymulowanych dawką D_1 . Pierwsze liście siewek uzyskanych z ziarniaków nie stymulowanych są znacznie krótsze i jest ich zdecydowanie mniej [36, 39, 42].

Zauważono także, iż na szalkach z ziarniakami nie stymulowanymi, wystąpiły pojedyncze ziarnaki pleśniejące, których nie zaobserwowano na szalkach z ziarniakami stymulowanymi.

6.2 Materiał i metodyka oceny wpływu stymulacji magnetycznej

Do doświadczeń użyto ziarniaków pszenicy ozimej odmiany „Symfonia” i nasion lnianki ozimej odmiany „Przybrodzka”.

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 [149].

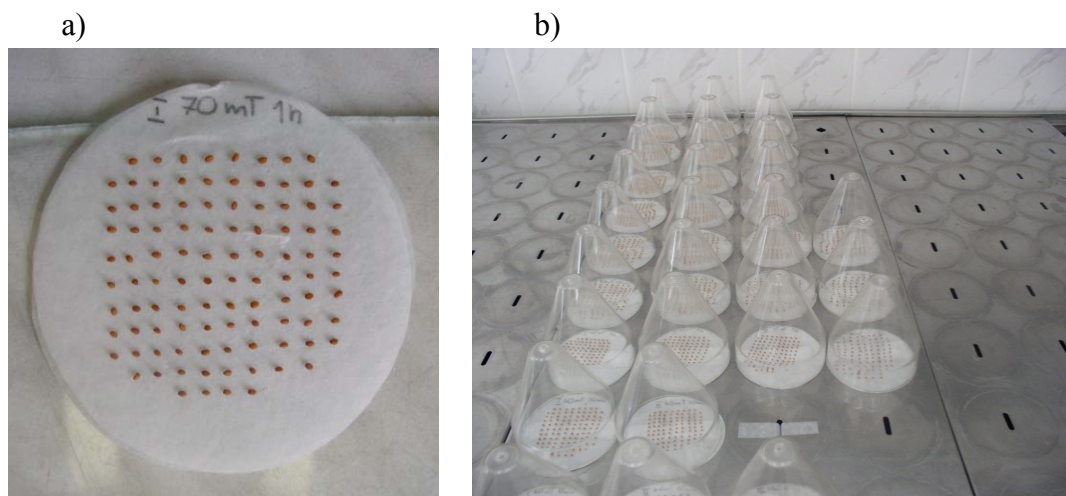


Rys. 6.2. a) zdjęcie przedstawiające próbę ziarniaków pszenicy bezpośrednio po wysiewie, b) szalki Petriego z wysianymi ziarniakami pszenicy

Ziarniak pszenicy ozimej odmiany „Symfonia” wysiewano na szalkach Petriego między bibułą (rys. 6.2). Szalki umieszczono w pomieszczeniu klimatyzowanym w temperaturze 20 °C. Każdą kombinację wysiewano w 3 powtórzeniach po 100 ziarniaków. Dodatkowo wysiewano po 100 ziarniaków w 3 powtórzeniach nie poddanych działaniu pola magnetycznego, które stanowiły kontrolę. Zdolność kiełkowania oznaczono po 8 dniach po wysiewie [70].

Nasiona lnianki odmiany „Przybrodzka” wysiewano w kiełkowniku Jacobsena (rys. 6.3), umieszczonym w pomieszczeniu klimatyzowanym w temperaturze 20 °C i oświetleniu 12 h na dobę. Wysiewano analogicznie jak dla pszenicy po 100 nasion w 3 powtórzeniach dla każdej kombinacji. W doświadczeniu zastosowano również nasiona

nie poddane działaniu pola magnetycznego czyli kontrolę. Zdolność kiełkowania oceniono po 10 dniach.



Rys. 6.3. a) zdjęcie przedstawiające próbę nasion lnianki bezpośrednio po wysiewie, b) kiełkownik Jacobsona z wysianymi ziarniakami lnianki

Od 2 dnia po wysiewie usuwano z podłoża ziarniaki pszenicy oraz nasiona lnianki, które wykształciły 2 mm kielek i korzonki. Obserwacje powtarzano co 24 h przez 10 dni. Obserwacje kiełkowania prowadzono w taki sam sposób dla ziarniaków pszenicy i nasion lnianki. Obserwacje te pozwoliły na oznaczenie wskaźników: szybkości kiełkowania Maguire'a, a także wskaźnika średniego czasu kiełkowania Piepera. Badania były prowadzone w Katedrze Hodowli Roślin i Nasiennictwa Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.

Dla otrzymanych wyników zdolności kiełkowania, średniego czasu kiełkowania wg Piepera oraz szybkości kiełkowania wg Maguire'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 (rys. 6.4 – 6.18). Różne litery wskazują na istotne różnice wpływu poszczególnych czynników.

Ze względu na odchylenie analizowanych obserwacji zdolności kiełkowania od rozkładu normalnego, wartości procentowe transformowano z zastosowaniem wzoru Bliss ($y = \arcsin \sqrt{t}$).

6.2.1 Zdolność kiełkowania

Zdolność kiełkowania oznacza procent normalnie skiełkowanych nasion w czasie określonym w normach. Jest jednym z parametrów wartości siewnej nasion.

6.2.2 Wskaźnik szybkości kiełkowania według Maguire'a

Wskaźnik szybkości kiełkowania wg Maguire'a (WSK) obliczany jako suma ilorazów normalnie skielkowanych nasion podzielonych przez kolejny dzień kiełkowania. Zależność do obliczenia tego wskaźnika przedstawia wzór (6.3) [2]:

$$WSK = \frac{m_1}{d_1} + \frac{m_2}{d_2} + \dots + \frac{m_n}{d_n} \quad (6.3)$$

gdzie:

m – liczba skielkowanych ziarniaków w kolejnych dniach obserwacji,
 d – numer dnia od wysiewu ziarniaków.

Wysoka wartość współczynnika Maguire'a świadczy o szybkim kiełkowaniu badanych ziarniaków. Dzięki dużej czułości tego wskaźnika, jest on bardzo przydatny w ocenie szybkości kiełkowania [19].

6.2.3 Wskaźnik średniego czasu kiełkowania jednego ziarniaka według Piepera

Wskaźnik średniego czasu kiełkowania jednego ziarniaka wg Piepera (WSCK) obliczany jako iloraz z sumy iloczynów liczby skielkowanych ziarniaków danego dnia i numeru dnia (od wysiewu do usunięcia ziarniaków z podłoża), do sumy skielkowanych ziarniaków w tych dniach. Wskaźnik ten oblicza się za pomocą zależności (6.4) [2]:

$$WSCK = \frac{(m_1 \cdot d_1 + m_2 \cdot d_2 + \dots + m_n \cdot d_n)}{(m_1 + m_2 + \dots + m_n)} \quad (6.4)$$

gdzie:

m – liczba skielkowanych ziarniaków w kolejnych dniach obserwacji,
 d – numer dnia od wysiewu ziarniaków.

Niska wartość współczynnika Piepera świadczy o wysokim wigorze nasion i szybkich wschodach, zaś im przebieg wschodów jest bardziej rozciągnięty w czasie, tym współczynnik jest wyższy [19].

6.3 Biostymulacja nasion zmiennym polem magnetycznym o częstotliwości 50 Hz

Znaczącym problemem badawczym w prowadzonych pracach był dobór czasu ekspozycji oraz wartości gęstości pola magnetycznego. Literatura krajowa i światowa nie podaje żadnych konkretnych wskazówek, jakimi założeniami kierowali się autorzy badań podczas doboru wartości czasu i indukcji magnetycznej. Interakcja czynników: indukcji magnetycznej i czasu stymulacji pozwala na określenie wpływu obu parametrów na przebieg kiełkowania badanych ziarniaków. Wprowadzone pojęcie dawki ekspozycyjnej umożliwia porównanie ze sobą kolejnych kombinacji indukcji magnetycznej i czasu, ponieważ możliwe jest w przypadku stymulacji roślin uzyskanie podobnego efektu przez zwiększenie lub zmniejszenie zastosowanej indukcji pola magnetycznego lub modyfikację czasu stymulacji zgodnie z ogólnie przyjętym założeniem (6.2) [19].

W doświadczeniu drugim badano wpływ zmiennego pola magnetycznego na ziarniaki pszenicy oraz nasiona lnianki. Zmienne pole magnetyczne wytworzono za pomocą solenoidu, opisanego w rozdziale 5.1. Wybrano trzy wartości indukcji pola magnetycznego do biostymulacji ziarniaków pszenicy i nasion lnianki: 40 [mT], 70 [mT] i 100 [mT]. Dla każdej wartości przyporządkowano trzy czasy ekspozycji: 15 [min], 30 [min], 60 [min].

6.3.1 Wyniki biostymulacji ziarniaków pszenicy

Na podstawie przeprowadzonych analiz wariancji stwierdzono istotny wpływ czasu ekspozycji na badane wskaźniki: zdolność kiełkowania, średni czas oraz szybkość kiełkowania dla ziarniaków pszenicy. Natomiast wartość indukcji pola magnetycznego oraz współdziałanie badanych czynników nie wykazały istotnego wpływu na badane wskaźniki kiełkowania.

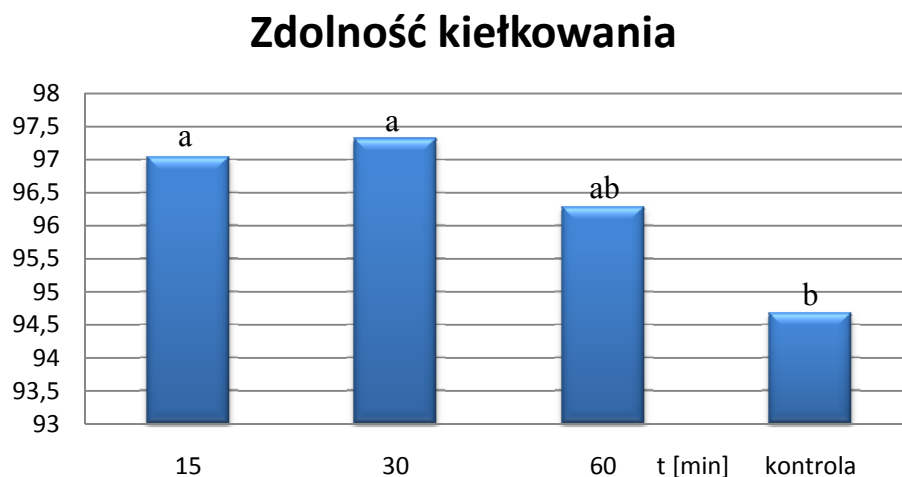
Tabela 6.1. Istotność zróżnicowania źródeł zmienności zdolności i wskaźników kiełkowania dla ziarniaków pszenicy poddanych biostymulacji zmiennym polem magnetycznym o częstotliwości 50 Hz

Źródła zmienności	Stopnie swobody	Zdolność kiełkowania	Średni czas kiełkowania wg Piepera	Szybkość kiełkowania wg Maguire'a
Indukcja pola (A)	2	2,75	0,0003	0,76
Czas ekspozycji (B)	3	27,44*	0,0043*	5,19**
Interakcja (A·B)	6	9,16	0,0014	0,98
Błąd	24	8,87	0,0012	0,77

* – istotne dla $\alpha = 0,05$

** – istotne dla $\alpha = 0,01$

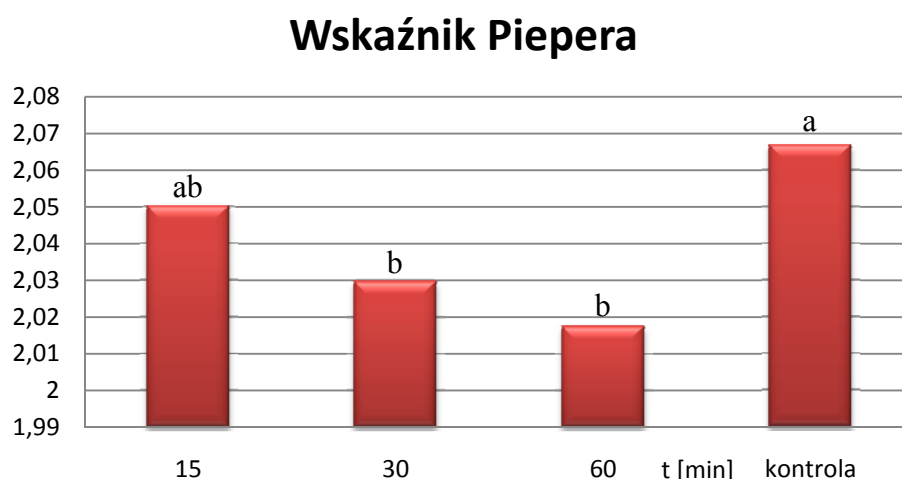
Zdolność kiełkowania ziaren pszenicy przyjmowała wysokie wartości (rys. 6.4), które zawierały się w przedziale od 92% do 100%. Czas ekspozycji 15 [min] i 30 [min] istotnie wpłynął na wzrost zdolności kiełkowania średnio o ok. 3%.



Rys. 6.4. Wpływ czasu ekspozycji na zdolność kiełkowania ziarniaków pszenicy stymulowanych zmiennym polem magnetycznym

– wartości średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie

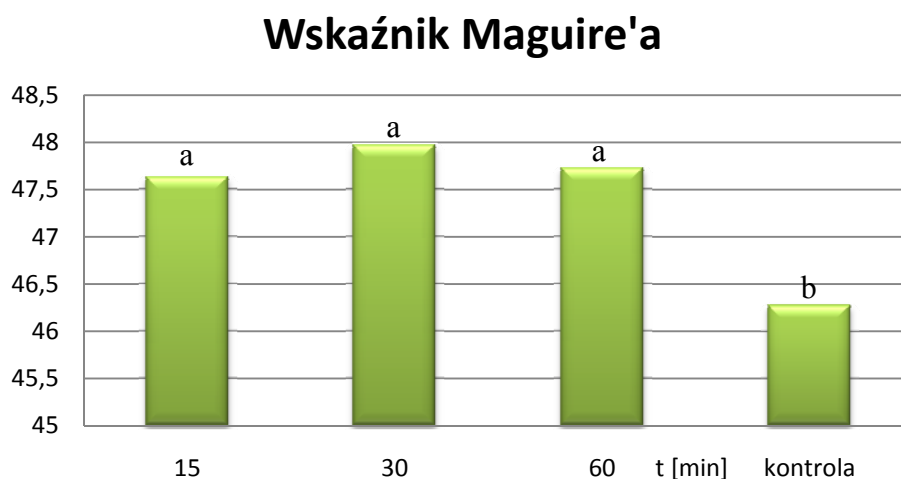
Wskaźnik średniego czasu kiełkowania ziaren pszenicy zawierał się w przedziale od 2,00 do 2,15 (rys. 6.5). Czas ekspozycji 30 [min] i 60 [min] miał istotny wpływ na skrócenie średniego czasu kiełkowania określonego za pomocą współczynnika Piepera, był on krótszy średnio o 2,5% od kontroli.



Rys. 6.5. Wpływ czasu ekspozycji na wskaźnik średniego czasu kiełkowania wg Piepera ziarniaków pszenicy stymulowanych zmiennym polem magnetycznym

– wartości średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie

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. 6.6). Czas ekspozycji istotnie wpłynął na wzrost szybkości kiełkowania średnio o 3,5% w porównaniu z szybkością kiełkowania ziarniaków kontroli.



Rys. 6.6. 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

6.3.2 Wyniki biostymulacji nasion lnianki

Analizy wariancji przeprowadzone dla wskaźników kiełkowania nasion lnianki wykazały istotny wpływ czasu ekspozycji na wszystkie badane wskaźniki w porównaniu do kontroli. Dla średniego czasu kiełkowania stwierdzono również istotną interakcję badanych czynników tj. wartości indukcji pola magnetycznego oraz czasu ekspozycji nasion.

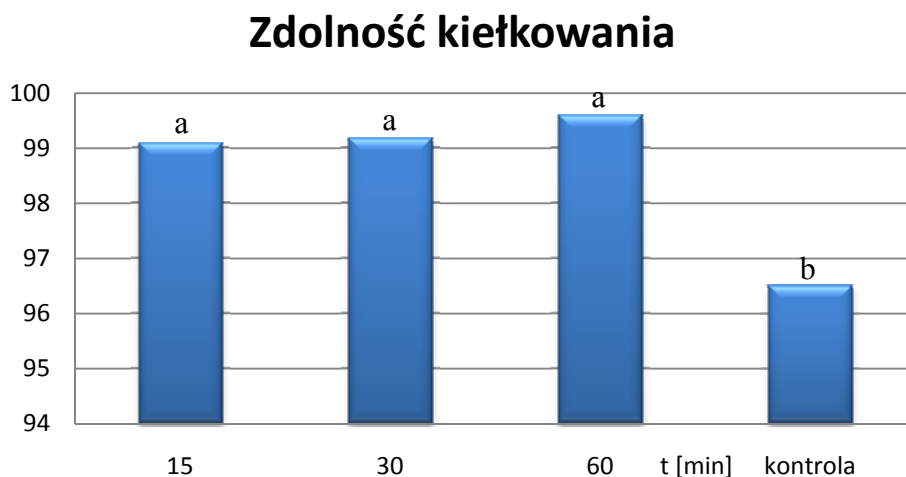
Tabela 6.2. Istotność zróżnicowania źródeł zmienności zdolności i wskaźników kiełkowania dla nasion lnianki poddanych biostymulacji zmiennym polem magnetycznym o częstotliwości 50 Hz

Źródła zmienności	Stopnie swobody	Zdolność kiełkowania	Średni czas kiełkowania wg Piepera	Szybkość kiełkowania wg Maguire'a
Indukcja pola (A)	2	25,53	0,00006	0,66
Czas ekspozycji (B)	3	86,24**	0,00681**	10,43**
Interakcja (A·B)	6	6,87	0,00093*	0,47
Błąd	24	16,39	0,00034	0,61

* – istotne dla $\alpha = 0,05$

** – istotne dla $\alpha = 0,01$

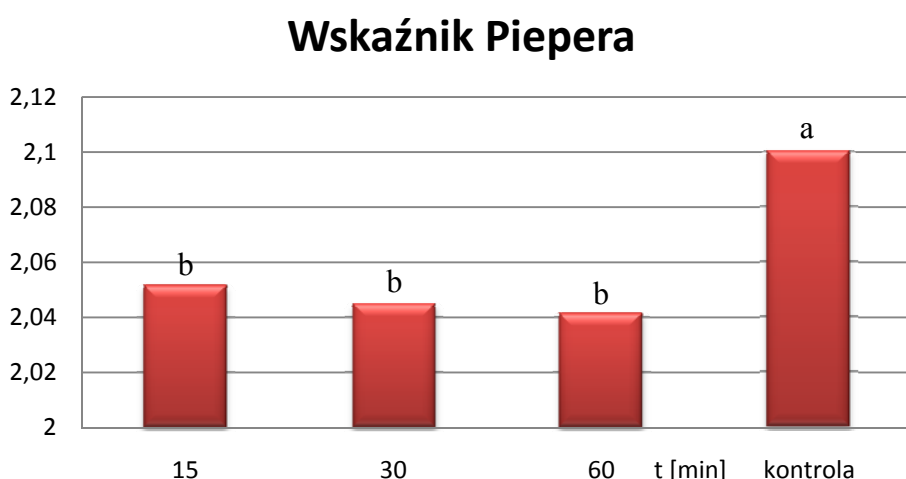
Zdolność kiełkowania nasion lniarki przyjmowała wysokie wartości, które zawierały się w przedziale od 94% do 100% (rys. 6.7). Stwierdzono istotny wpływ czasu ekspozycji pola magnetycznego na zdolność kiełkowania nasion lniarki. Wartości zdolności kiełkowania nasion po biostymulacji były wyższe średnio o 3% w porównaniu do nasion kontroli.



Rys. 6.7. Wpływ czasu ekspozycji na zdolność kiełkowania nasion lniarki stymulowanych zmiennym polem magnetycznym

– wartości średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie

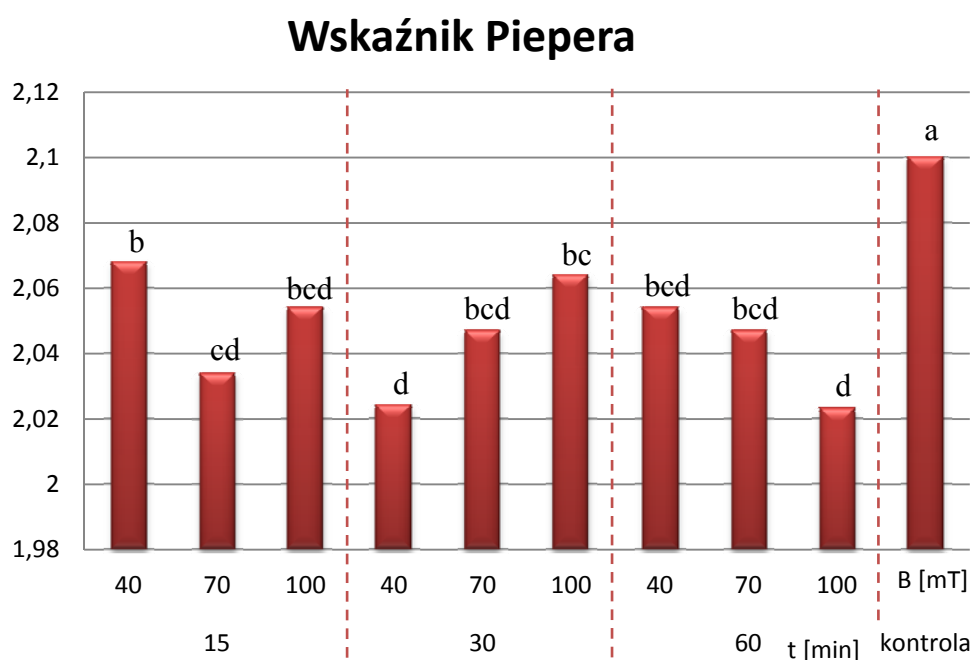
Wskaźnik średniego czasu kiełkowania nasion lniarki zawierał się w przedziale od 2,00 do 2,11 (rys. 6.8). Stwierdzono istotne skrócenie średniego czasu kiełkowania pod wpływem biostymulacji.



Rys. 6.8. Wpływ czasu ekspozycji na wskaźnik średniego czasu kiełkowania wg Piepera nasion lniarki 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. 6.9). Nasiona kontroli charakteryzowały się istotnie dłuższym średnim czasem kiełkowania.

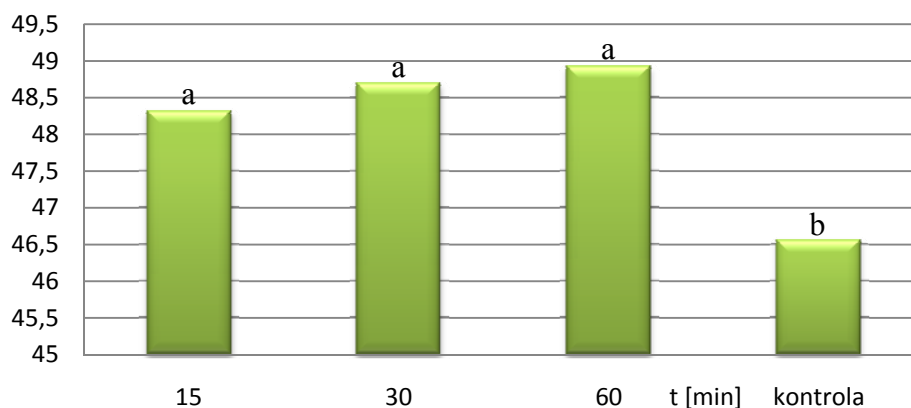


Rys. 6.9. Wpływ pola magnetycznego i czasu ekspozycji na wskaźnik średniego czasu kiełkowania wg Piepera, nasion lnianki stymulowanych zmiennym polem magnetycznym

– wartości średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie

Szybkość kiełkowania oznaczona za pomocą współczynnika Maguire’a dla nasion lnianki stymulowanych polem magnetycznym zawierała się w przedziale od 45,5 do 49,5 (rys. 6.10). Czas ekspozycji istotnie wpłynął na wzrost szybkości kiełkowania średnio o 5% w porównaniu z szybkością kiełkowania ziarniaków kontroli.

Wskaźnik Maguire'a



Rys. 6.10. Wpływ czasu ekspozycji na wskaźnik szybkości kiełkowania wg Maguire'a nasion lnianki stymulowanych zmiennym polem magnetycznym

– wartości średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie

6.4 Biostymulacja stałym polem magnetycznym

Doświadczenie trzecie polegało na umieszczeniu ziarniaków pszenicy i nasion lnianki w stałym polu magnetycznym. Do wzbudzenia stałego pola magnetycznego użyto elektromagnesów z uzwojeniem nadprzewodnikowym opisanych w rozdziałach 5.2.1 oraz 5.2.2, a także magnesów trwałych.

6.4.1 Wyniki biostymulacji ziarniaków pszenicy

Do biostymulacji ziarniaków pszenicy wybrano pola magnetyczne stałe o 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].

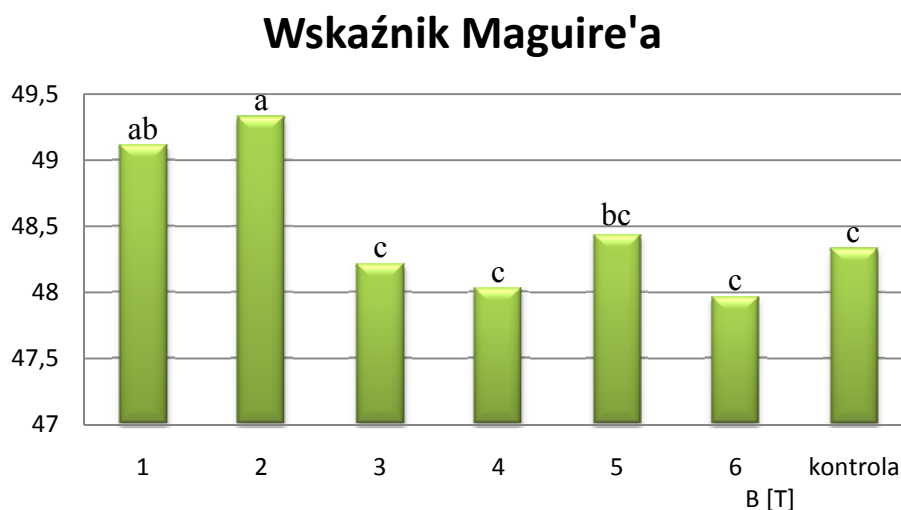
Tabela 6.3. Istotność zróżnicowania źródeł zmienności zdolności i wskaźników kiełkowania dla ziarniaków pszenicy poddanych biostymulacji stałym polem magnetycznym

Źródła zmienności	Stopnie swobody	Zdolność kiełkowania	Średni czas kiełkowania wg Piepera	Szybkość kiełkowania wg Maguire'a
Indukcja pola (A)	5	5,95	0,00075	4,00**
Czas ekspozycji (B)	3	14,11	0,00119	0,94
Interakcja (A·B)	15	6,53	0,00112	1,44
Błąd	48	9,05	0,00123	0,99

** – istotne dla $\alpha = 0,01$

Stwierdzono istotny wpływ pola magnetycznego o wartości indukcji 1 [T] i 2[T] na szybkość kiełkowania oznaczonej za pomocą współczynnika Maguire'a, dla tych pól szybkość kiełkowania zwiększyła się średnio o 2% (rys. 6.11). Pozostałe wartości pola magnetycznego użyte do biostymulacji nie wpłynęły na szybkość kiełkowania. Nie stwierdzono również istotnego wpływu czasu ekspozycji na wzrost szybkości kiełkowania w porównaniu do kontroli.

Uzyskane wyniki zdolności kiełkowania i średniego czasu kiełkowania nie różniły się istotnie w porównaniu do kontroli. Zarówno czas ekspozycji jak i wartości pola magnetycznego nie wpłynęły na wartość tych wskaźników, które w wypadku zdolności kiełkowania wahały się od 96% do 100%, a średniego czasu kiełkowania od 1,98 do 2,07.



Rys. 6.11. Wpływ wartości indukcji pola magnetycznego na wskaźnik szybkości kiełkowania wg Maguire'a ziarniaków pszenicy

– wartości średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie

6.4.2 Wyniki biostymulacji nasion lnianki

Biostymulację nasion lnianki przeprowadzono w polu stałym o wartościach indukcji: 1 [T], 2 [T], 3 [T], 4 [T], 5 [T] czasy ekspozycji były takie same jak w przypadku stymulacji ziarniaków pszenicy czyli 1 [min], 5 [min], 10 [min].

Tabela 6.4. Istotność zróżnicowania źródeł zmienności zdolności i wskaźników kiełkowania dla nasion lnianki poddanych biostymulacji stałym polem magnetycznym

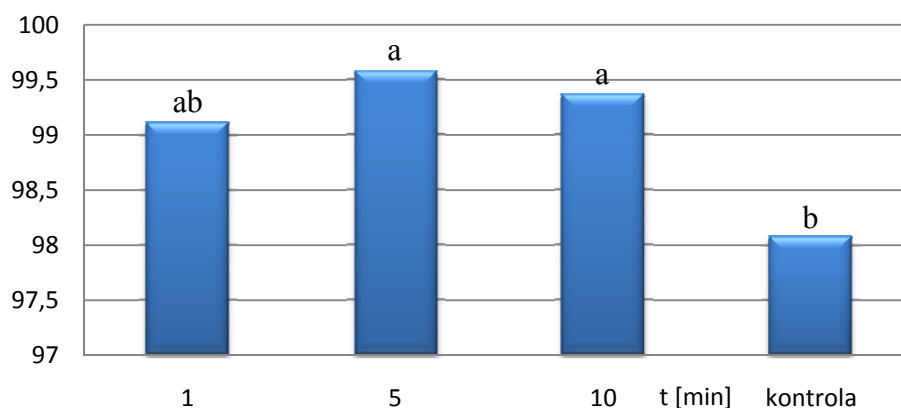
Źródła zmienności	Stopnie swobody	Zdolność kiełkowania	Średni czas kiełkowania wg Piepera	Szybkość kiełkowania wg Maguire'a
Indukcja pola (A)	4	30,23	0,0203**	4,47**
Czas ekspozycji (B)	3	50,09*	0,2585**	75,38**
Interakcja (A·B)	12	7,07	0,0070**	1,98**
Błąd	40	12,47	0,0017	0,58

* – istotne dla $\alpha = 0,05$

** – istotne dla $\alpha = 0,01$

Zdolność kiełkowania przyjmowała wysokie wartości które wahały się od 97% do 100% (rys. 6.12). Na podstawie przeprowadzonej analizy wariancji, stwierdzono istotny wpływ czasu ekspozycji nasion lnianki polem magnetycznym na zdolność kiełkowania. Dla czasu 5 [min] i 10 [min] obserwowano istotnie wyższą zdolność kiełkowania w porównaniu do kontroli. Przy tak wysokiej zdolności różnice wprawdzie istotne ale wynosiły tylko 1,06%. Nie zaobserwowano natomiast wpływu wartości pola magnetycznego na tą cechę.

Zdolność kiełkowania



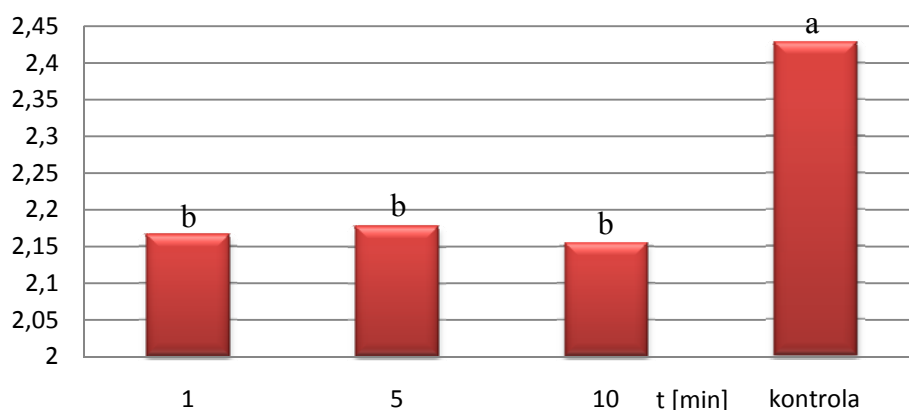
Rys 6.12. Wpływ czasu ekspozycji na zdolność kiełkowania nasion lnianki stymulowanych stałym polem magnetycznym

– wartości średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie

Na podstawie przeprowadzonej dwuczynnikowej analizy wariancji, stwierdzono istotny wpływ badanych czynników: czasu ekspozycji (rys. 6.13) i wartości indukcji pola (rys. 6.14), a także ich współdziałanie (rys. 6.15), na średni czas kiełkowania. Wskaźnik średniego czasu kiełkowania nasion lnianki zawierał się w przedziale od 2,06 do 2,48.

Czas ekspozycji istotnie skrócił średni czas kiełkowania nasion lniarki (rys. 6.13), w porównaniu do kontroli. Wartość indukcji pola magnetycznego w zróżnicowany sposób skróciło średni czas kiełkowania. Największy efekt obserwowano przy zastosowaniu pola magnetycznego o wartościach indukcji 3 [T] i 4 [T].

Wskaźnik Piepera

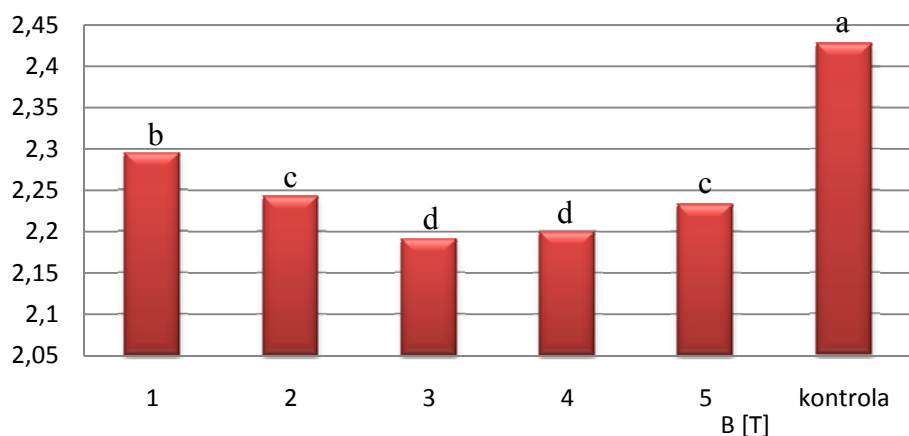


Rys. 6.13. Wpływ czasu ekspozycji na wskaźnik średniego czasu kiełkowania wg Piepera nasion lniarki stymulowanych stałym polem magnetycznym

– wartości średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie

Niezależnie od czasu ekspozycji, również wartość indukcji pola magnetycznego przyczyniła się do skrócenia średniego czasu kiełkowania w porównaniu do kontroli (rys. 6.14). Największy efekt zaobserwowano po zastosowaniu pola magnetycznego o wartościach indukcji 3 [T] i 4 [T].

Wskaźnik Piepera

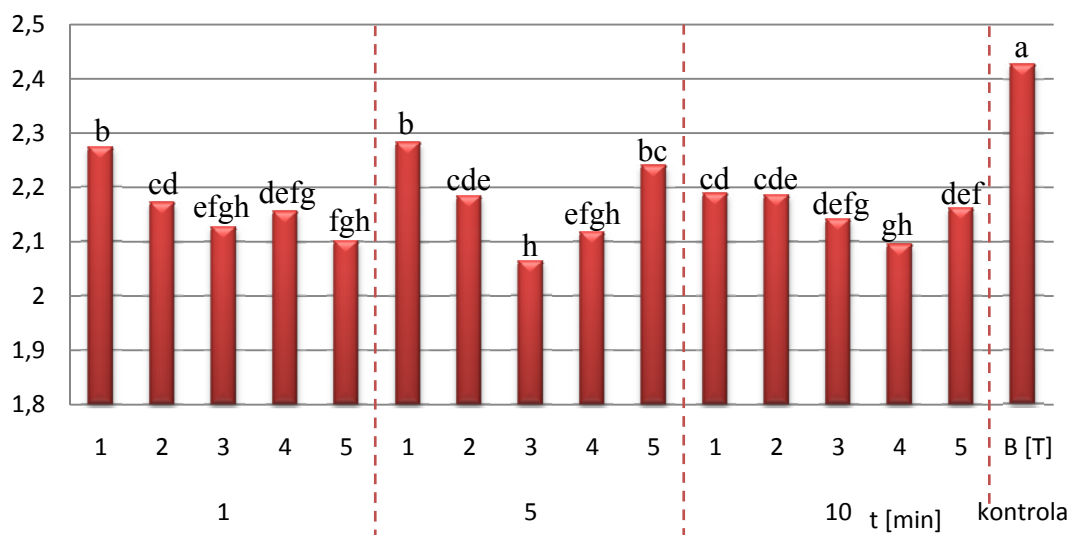


Rys. 6.14. Wpływ wartości indukcji pola magnetycznego na wskaźnik średniego czasu kiełkowania wg Piepera nasion lniarki

– wartości średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie

Wykazano również istotne współdziałanie badanych czynników (rys. 6.15). Najkrótszy średni czas kiełkowania obserwowano po biostymulacji polem magnetycznym o wartości indukcji 3 [T] i czasie ekspozycji 5 [min].

Wskaźnik Piepera

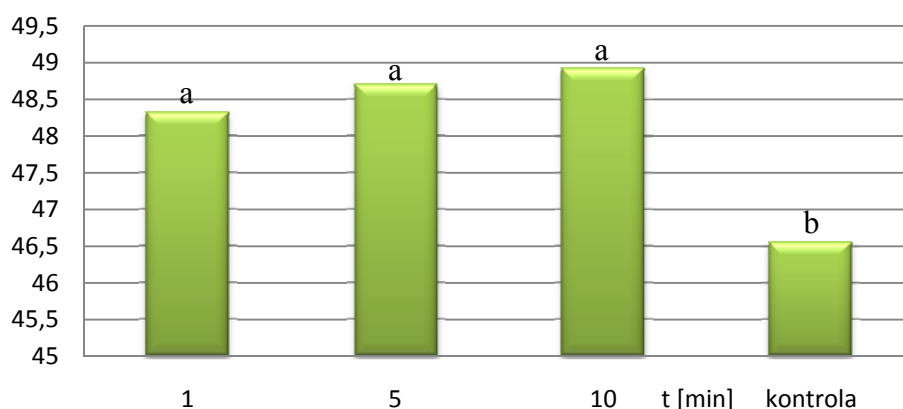


Rys. 6.15. Wpływ wartości indukcji pola magnetycznego i czasu ekspozycji na wskaźnik średniego czasu kiełkowania wg Piepera nasion lnianki stymulowanych stałym polem magnetycznym

– wartości średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie

Wartości szybkości kiełkowania wahały się od 42,6 do 49,0 (rys. 6.16). Dwuczynnikowa analiza wariacji szybkości kiełkowania wykazała istotny wpływ wartości indukcji pola magnetycznego i czasu ekspozycji oraz współdziałania badanych czynników.

Wskaźnik Maguire'a

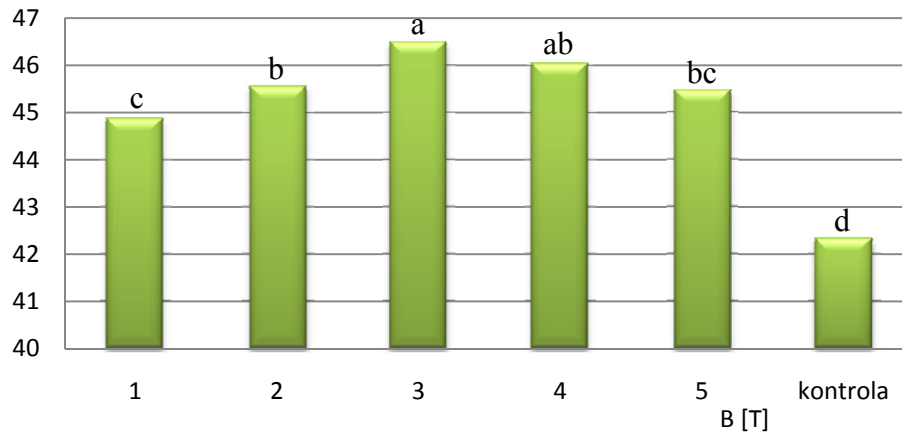


Rys. 6.16. Wpływ czasu ekspozycji na wskaźnik szybkości kiełkowania wg Maguire'a nasion lnianki stymulowanych stałym polem magnetycznym

– wartości średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie

Istotnie wyższe wskaźniki szybkości kiełkowania stwierdzono niezależnie od czasu ekspozycji w porównaniu do kontroli. Wartość indukcji pola magnetycznego wywołała istotny lecz zróżnicowany wpływ na szybkość kiełkowania (rys. 6.17).

Wskaźnik Maguire'a

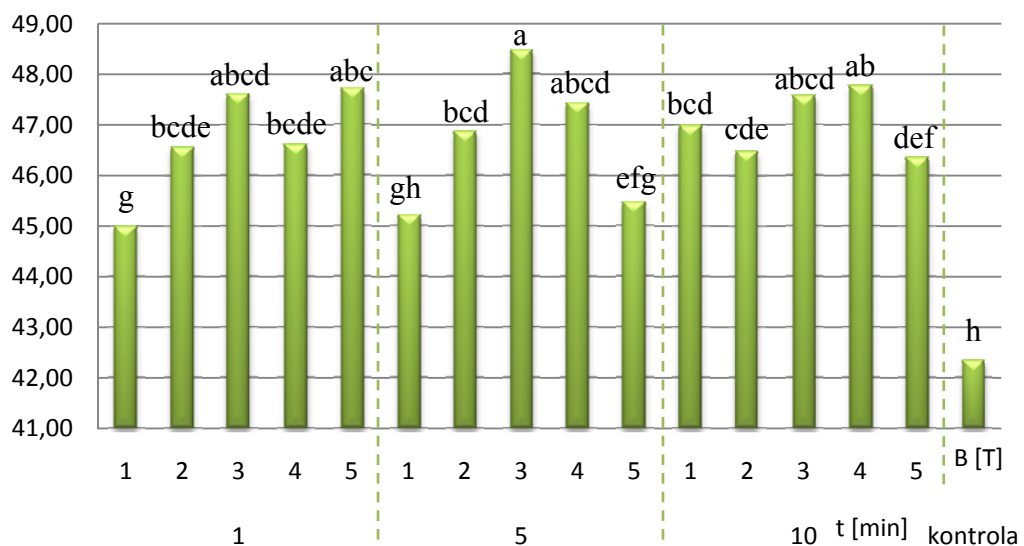


Rys. 6.17. Wpływ stałego pola magnetycznego na wskaźnik szybkości kiełkowania wg Maguire'a nasion lniarki stymulowanych

– wartości średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie

Wykazano również istotne współdziałanie badanych czynników na szybkość kiełkowania rys. 6.18. Najwyższe wartości szybkości kiełkowania obserwowano przy zastosowaniu pola o wartości indukcji 3 [T] i czasie ekspozycji 5 [min].

Wskaźnik Maguire'a



Rys. 6.18. Wpływ wartości indukcji pola magnetycznego i czasu ekspozycji na wskaźnik szybkości kiełkowania wg Maguire'a nasion lniarki stymulowanych stałym polem magnetycznym

– wartości średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie

6.5 Zależność wskaźników kiełkowania od dawki ekspozycyjnej

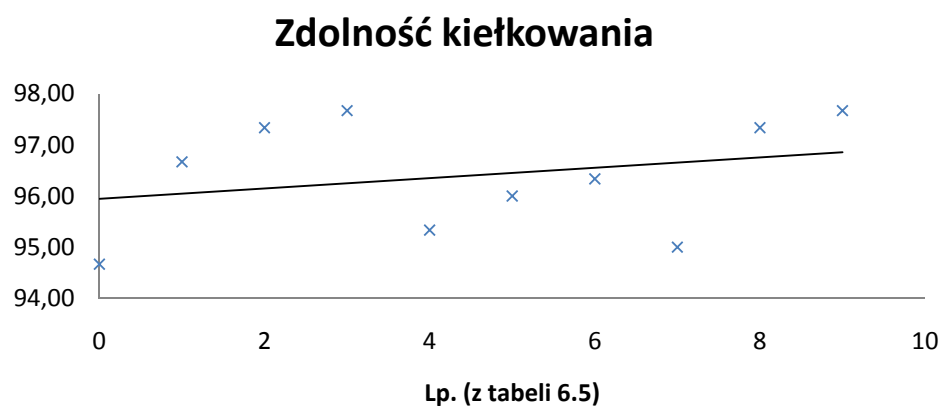
W rozdziale 6.5 przedstawiono wykresy wskaźników kiełkowania ziarniaków pszenicy i nasion lnianki w zależności od zastosowanej dawki ekspozycyjnej.

a) Ziarniaki pszenicy stymulowane zmiennym polem magnetycznym

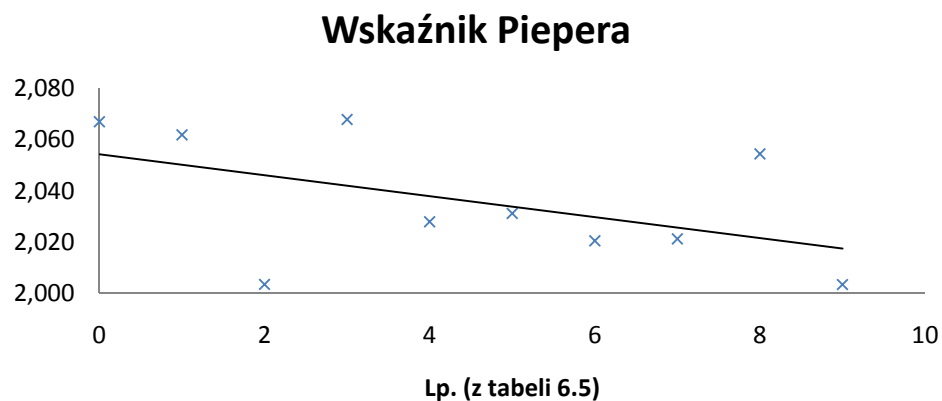
Tabela 6.5. Dawki ekspozycyjne zastosowane do stymulacji ziarniaków pszenicy zmiennym polem magnetycznym

Lp.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dawka ekspozycyjna [Jm ⁻³ s]	Kontrola	1,15 · 10 ⁶	2,29 · 10 ⁶	3,51 · 10 ⁶	4,58 · 10 ⁶	7,02 · 10 ⁶	7,16 · 10 ⁶	1,40 · 10 ⁷	1,43 · 10 ⁷	2,86 · 10 ⁷

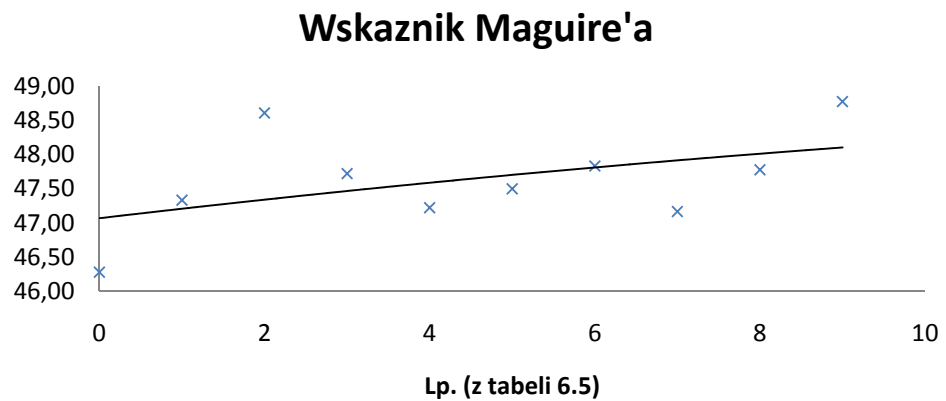
a)



b)



c)



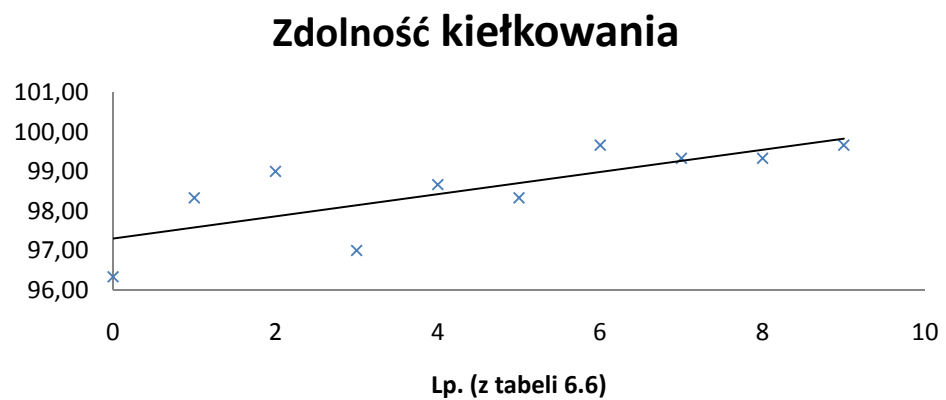
Rys. 6.19. Wskaźniki kiełkowania ziarniaków pszenicy stymulowanych zmiennym polem magnetycznym a) zdolność kiełkowania, b) wskaźnik Piepera, c) wskaźnik Maguire'a

b) Nasiona lnianki stymulowane zmiennym polem magnetycznym

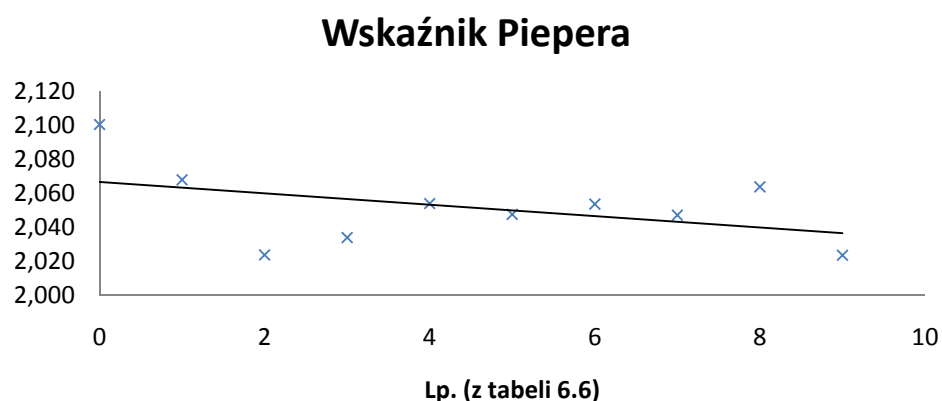
Tabela 6.6. Dawki ekspozycyjne zastosowane do stymulacji nasion lnianki zmiennym polem magnetycznym

Lp.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dawka ekspozycyjna [Jm ⁻³ s]	Kontrola	1,15 · 10 ⁶	2,29 · 10 ⁶	3,51 · 10 ⁶	4,58 · 10 ⁶	7,02 · 10 ⁶	7,16 · 10 ⁶	1,40 · 10 ⁷	1,43 · 10 ⁷	2,86 · 10 ⁷

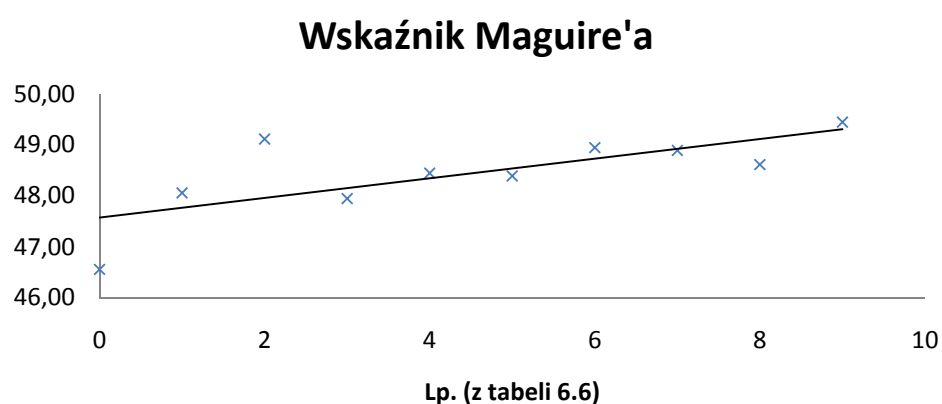
a)



b)



c)



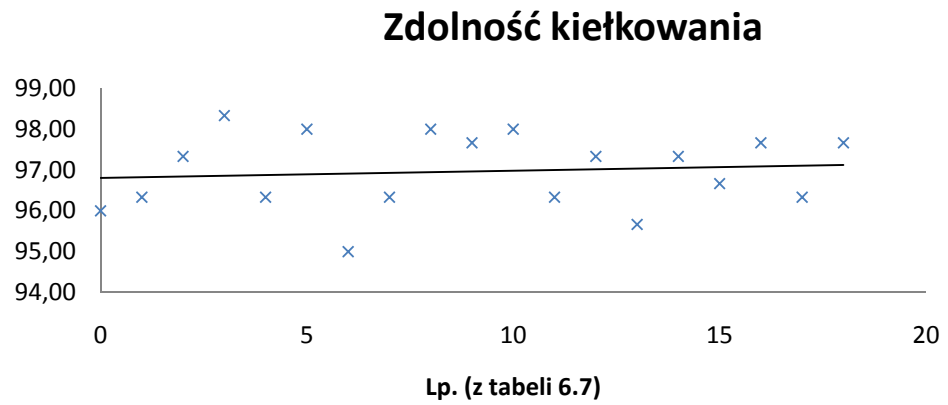
Rys. 6.20. Wskaźniki kiełkowania nasion lniarki stymulowanych zmiennym polem magnetycznym a) zdolność kiełkowania, b) wskaźnik Piepera, c) wskaźnik Maguire'a

c) Ziarniki pszenicy stymulowane stałym w czasie polem magnetycznym

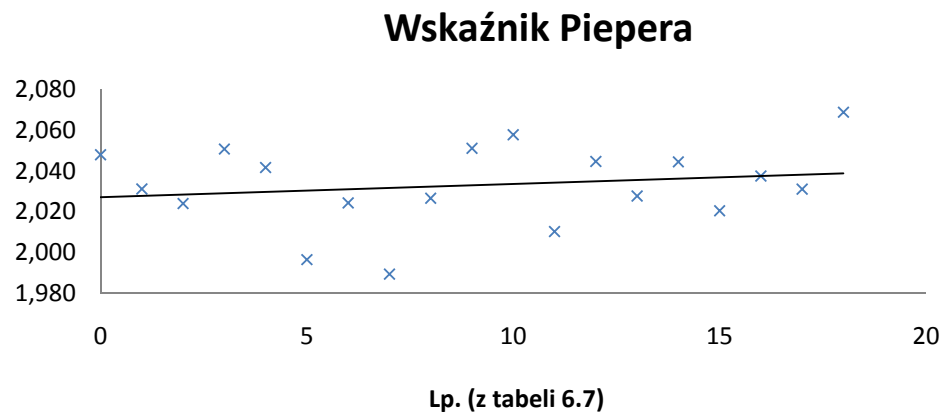
Tabela 6.7. Dawki ekspozycyjne zastosowane do stymulacji ziarniaków pszenicy stałym w czasie polem magnetycznym

Lp.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dawka ekspozycyjna [Jm ⁻³ s]	Kontrola	4,77 · 10 ⁷	1,91 · 10 ⁸	2,39 · 10 ⁸	4,30 · 10 ⁸	4,77 · 10 ⁸	7,64 · 10 ⁸	9,55 · 10 ⁸	1,19 · 10 ⁹	1,72 · 10 ⁹
Lp.		10	11	12	13	14	15	16	17	18
Dawka ekspozycyjna [Jm ⁻³ s]		1,91 · 10 ⁹	2,15 · 10 ⁹	3,82 · 10 ⁹	4,30 · 10 ⁹	5,97 · 10 ⁹	7,64 · 10 ⁹	8,59 · 10 ⁹	1,19 · 10 ¹⁰	1,72 · 10 ¹⁰

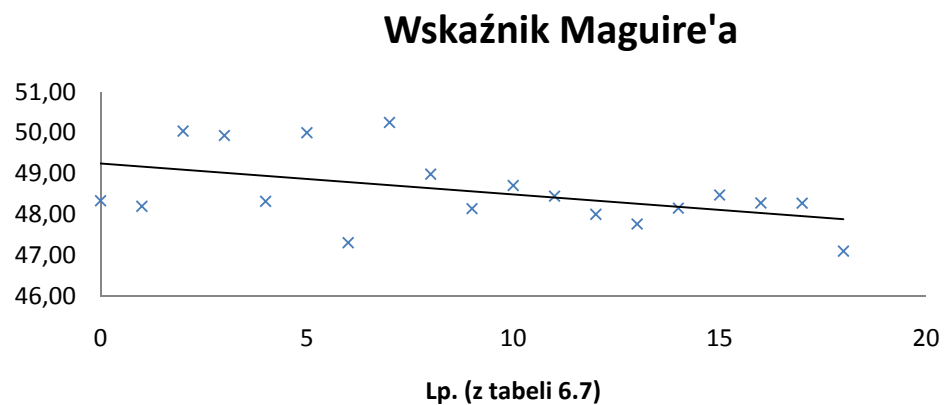
a)



b)



c)



Rys. 6.21. Wskaźniki kiełkowania ziarniaków pszenicy stymulowanych stałym w czasie polem magnetycznym a) zdolność kiełkowania, b) wskaźnik Piepera, c) wskaźnik Maguire'a

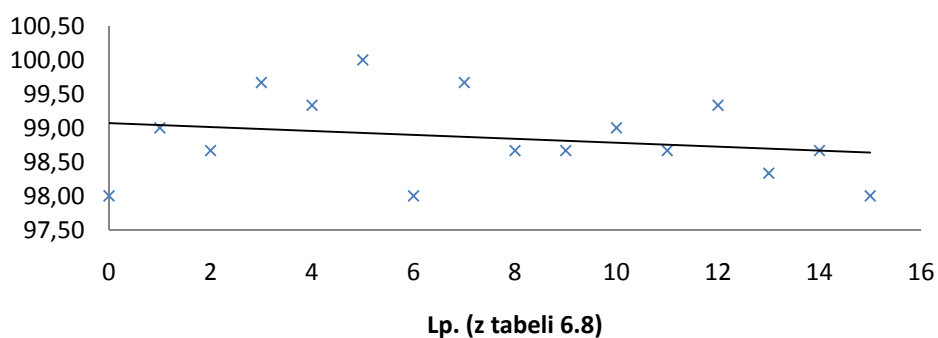
d) Nasiona lnianka stymulowane stałym w czasie polem magnetycznym

Tabela 6.8. Dawki ekspozycyjne zastosowane do stymulacji nasion pszenicy stałym w czasie polem magnetycznym

Lp.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Dawka ekspozycyjna [Jm ⁻³ s]	Kontrola	4,77 · 10 ⁷	1,91 · 10 ⁸	2,39 · 10 ⁸	4,30 · 10 ⁸	4,77 · 10 ⁸	7,64 · 10 ⁸	9,55 · 10 ⁸	1,19 · 10 ⁹
Lp.		9	10	11	12	13	14	15	
Dawka ekspozycyjna [Jm ⁻³ s]		1,91 · 10 ⁹	2,15 · 10 ⁹	3,82 · 10 ⁹	4,30 · 10 ⁹	5,97 · 10 ⁹	7,64 · 10 ⁹	1,19 · 10 ¹⁰	

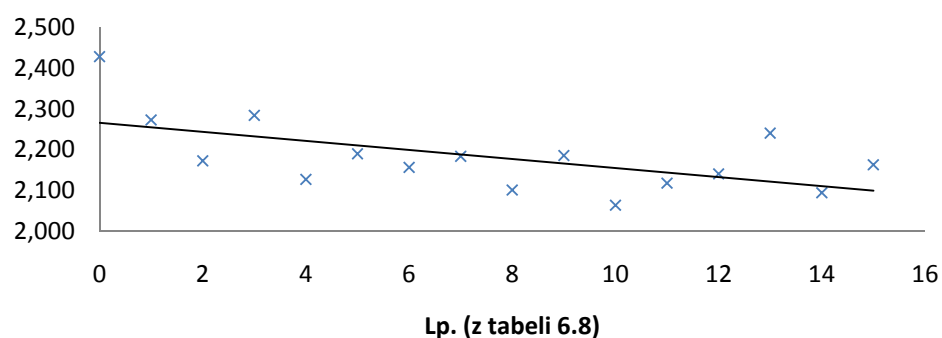
a)

Zdolność kiełkowania

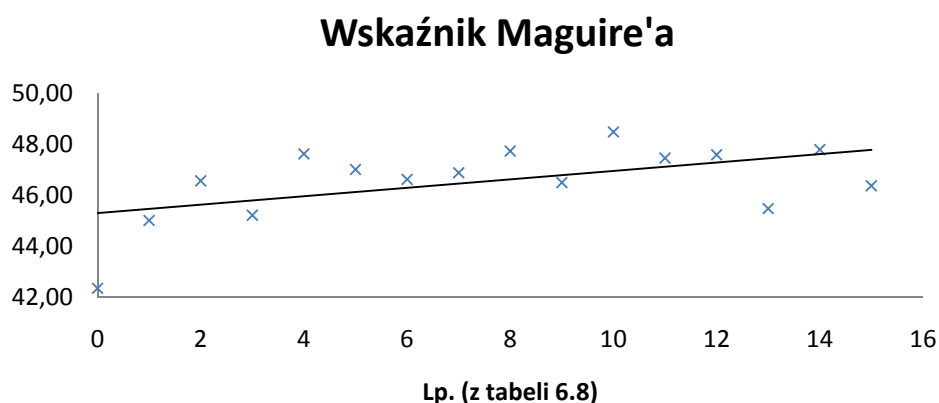


b)

Wskaźnik Piepera



c)



Rys. 6.22. Wskaźniki kiełkowania nasion lniarki stymulowanych stałym w czasie polem magnetycznym a) zdolność kiełkowania, b) wskaźnik Piepera, c) wskaźnik Maguire'a

Wykresy (rys. 6.19 – 6.22) przedstawiają średnie wartości wskaźników kiełkowania dla danej dawki ekspozycyjnej oraz trendy liniowe obliczone na ich podstawie.

Dla ziarniaków i 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.

Stymulacja stałym w czasie polem magnetycznym wpłynęła w zróżnicowany sposób na poszczególne wskaźniki w badanych próbkach.

Dla ziaren pszenicy można zaobserwować rosnący trend na wykresie zdolności kiełkowania oraz czasie kiełkowania, natomiast dla szybkości kiełkowania trend jest malejący. Wynika z tego, że wzrost dawki ekspozycyjnej wpłynął pozytywnie na zdolność kiełkowania ziarniaków, natomiast ze względu na szybkość kiełkowania oraz czas kiełkowania nie jest celowym stymulowanie ziaren dużą dawką ekspozycyjną. Jednak warto zauważyć, że większa liczba wskaźników ma lepsze wartości niż kontrola. Dla nasion lniarki 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.

6.6 Podsumowanie badań przedśiewnej biostymulacji ziarniaków i nasion

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.

Rozdział 7

Wnioski i podsumowanie

Zgodnie ze sformułowaną we Wprowadzeniu tezą 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 temperaturową 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.

Spis literatury

1. Aceto H., Tobias C. A., Silver I. L.: „*Some Studies on the biological effects of magnetic fields*” IEEE Transactions on Magnetics Vol. 6, No. 2, 1970, s.368-373
2. Adair R. K.: „*Constraints on biological effects of weak extremely-low-frequency electromagnetic fields*” Physical Review A, Vol. 43, No. 2, 1991, s.1039-1048
3. Adair R. K.: „*Comment: Influence of Stationary Magnetic Fields on Water Relations in Lettuce Seeds*” Bioelectromagnetics Vol. 23, 2002, s.550
4. Adey R.W.: „*Biological effects of electromagnetic field*” Journal of Cellular Biochemistry Vol. 51, 1993, s.410-416
5. Aksenov S.I., Bulychew A.A., Grunina T. Yu., Turovetskii V.B.: „*Mechanisms of action of a low-frequency magnetic field on the initial stages of germination of wheat seeds*” Biophysics Vol. 41, No. 4, 1997, s. 931-937
6. Aksenov S.I., Bulychew A.A., Grunina T. Yu., Turovetsky V.B.: „*Effects of elf-emf treatment on wheat seeds at different stages of gemination and possible mechanisms of their origin*” Electromagnetic Biology and Medicine 2001, Vol. 20, No. 2, s. 231-253
7. Aladjadjian A., Ylieva T.: „*Influence of stationary magnetic field on the early stages of the development of tobacco seeds (nicotiana tabacum l.)*” Journal of Central European Agriculture Vol. 4, No. 2, 2003, s.131-138
8. Aladjadjian A.: „*Study of the influence of magnetic field on some biological characteristics of zea mais*” Journal of Central European Agriculture Vol. 3, No. 2, 2003, s.89-94
9. Aladjadjian A.: „*Influence of stationary magnetic field on lentil seeds*” Int. Agrophysics Vol. 24, 2010, s.321-324
10. Ashcroft N.W., Mermin N.D.: „*Fizyka ciała stałego*” PWN Warszawa 1986
11. Balouchi H.R., Modarres Sanavy S.A.M.: „*Electromagnetic field impact on annual medics and dodder seed germination*” Int. Agrophysics Vol. 23, 2009, s.111-115
12. Banaś A.: „*Badanie stopnia utlenienia żelaza w materiałach roślinnych metodą XANES.*” Praca inżynierska, AGH WFiIS Kraków 2007

13. Banaś A.: „*Badanie żelaza w materiałach roślinnych metodą XAFS*” Praca magisterska, AGH WFiIS Kraków 2008
14. Baran J.: „*Elektrostatyczne efekty strykcyjne w dielektrycznej sferoidzie o strukturze warstwowej*” rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 1990
15. Bare S. R.: „*XANES Measurements and Interpretation*” EXAFS Data Collection and Analysis Course, NSLS, September 2002, s.23-25
16. Barnes F. S.: „*Mechanisms for electric and magnetic fields effects on biological cells*” IEEE Transactions on magnetic Vol. 41, No. 11, 2005, s.4219- 4224
17. Becker R. O.: „*The biological effects of magnetic fields - a survey*” Medical Electronics Biologic Engineering, Pergamon Press, Printed in Great Britain Vol. 1, 1963, s.293-303
18. Belyavskaya N.A.: „*Biological effects due to weak magnetic field on plants*” Advances in Space Research Vol. 34, 2004, s.1566-1574
19. Binek A., Moś M.: „*Charakterystyka wskaźników szybkości kiełkowania nasion*” Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin 1984, No. 153, s.11–18
20. Binhi V.N.: „*Theoretical concepts in magnetobiology*” Electro- and Magnetobiology Vol. 20(1) 2001, s.43-58
21. Binhi V.N.: „*Magnetobiology underlying physical problem*” Academic Press Elsevier Science Ltd. 2002
22. Blanchard J. P.: „*Modeling Biological Effects from Magnetic Fields*” IEEE AES Systems Magazine, 1996, s.6-10
23. Bradford K.J.: „*A Water Relations Analysis of Seed Germination Rates*” Plant Physiol. Vol. 94, 1990, s.840-849
24. Bujak K., Frant M.: „*Wpływ przedsiwnej stymulacji nasion zmiennym polem magnetycznym na plonowanie pszenicy jarej*” Acta Agrophysica Vol. 14(1), 2009, s.19-29
25. Bujak K., Frant M.: „*Wpływ przedsiwnej stymulacji nasion zmiennym polem magnetycznym na plonowanie i jakość technologiczną ziarna pszenicy ozimej*” Acta Agrophysica Vol. 15(2), 2010, s.233-245
26. Camps-Raga B., Gyawali S., Islam N. E.: „*Germination rate studies of soybean under static and low-frequency magnetic fields*” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 16, No. 5, 2009, s. 1317-1321
27. Cantor M., Pop I., Korosfoj S.: „*Studies concerning the effect of gamma radiation and magnetic field exposure on gladiolus*” Journal of Central European Agriculture Vol. 3, No. 4, 2002, s.277-284
28. Carbonell M. V., Martinez E., Amaya J.M.: „*Stimulation of germination in rice (oryza stiva l.) by a static magnetic field*” Electro- and Magnetobiology Vol. 19(1), 2000, s.121-128
29. Celestino C., Picazo M. L., Toribio M., Alvarez-Ude J.A., Bardasano J.L.: „*Influence of 50 Hz electromagnetic fields on recurrent embryogenesis and germination of cork oak somatic embryos*” Plant Cell, Tissue and Organ Culture Vol.54, 1998, s.65-69

30. Celestino C., Picazo M. L., Toribio M.: „*Influence of chronic exposure to an electromagnetic field on germination and early growth of quercus suber seeds: preliminary study*” *Electro- and Magnetobiology* Vol. 19(1), 2000, s.115-120
31. Chang H.: „*Fields external to open – structure magnetic device represented by ellipsoid or spheroid*”, *Br. J. Appl. Phys.* Vol. 12, 1961, s.160-163
32. Chen D., Brug J.A., Goldfarb R.B.: „*Demagnetizing factors for cylinders*”, *IEEE Transactions on Magnetism* Vol. 27, 1991, s.3601-3619
33. Cieśla A.: „*Analiza stanów pracy separatora matrycowego z elektromagnesem nadprzewodnikowym jako źródłem pola*”, Wydawnictwa AGH, seria: Rozprawy, Monografie, Nr 44, Kraków 1996
34. 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
35. 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
36. Cieśla A., Kraszewski W., **Skowron M.**, Syrek P.: „*Wykorzystanie silnego pola magnetycznego wzbudzonego przez elektromagnes nadprzewodnikowy do biostymulacji przedświejnej nasion*” *AGROLASER 2006* Lublin 5–7. 09. 2006, PTA 2006, s.26-33
37. Cieśla A., Kraszewski W., **Skowron M.**: „*Możliwości zastosowania nadprzewodnictwa*” *Pomiary Automatyka Kontrola* nr 3, 2007, s.95-101
38. 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
39. Cieśla A., **Skowron M.**: „*Biostymulacja ziarniaków silnym stałym polem magnetycznym*” *Prace Instytutu Elektrotechniki* Vol. 55, No. 236, 2008, s.143-167
40. 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
41. 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
42. Cieśla A., Kraszewski W., **Skowron M.**: „*Zastosowanie elektromagnesu nadprzewodnikowego do biostymulacji przedświejnej nasionsilnym polem magnetycznym*” *Zastosowania nadprzewodników ZN-8* ISBN 978-83-61301-15-8 Lublin, 2008, s.72–79
43. 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

44. 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
45. Coey J.M.D., Cass S.: „Magnetic water treatment” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* Vol. 209, 2000, s.71-74
46. Dacha M., Accorsi A., Pierotti C., Vetrano F., Matovani R., Guidi G., Conti R., Nicolini P.: „Studies on the Possible Biological Effects of 50 Hz Electric and/or Magnetic Fields: Evaluation of Some Glycolytic Enzymes, Glycolytic Flux, Energy and Oxidoreductive Potentials in Human Erythrocytes Exposed In Vitro to Power Frequency Fields” *Bioelectromagnetics* Vol. 14, 1993, s.383-391
47. Dalba G.: „Un'introduzione alla spettroscopia XAFS - Corso di laurea in fisica”, *Universita' di Trento*, 2001-2002
48. Dattilo A.M., Bracchini L., Loisel S.A., Ovidi E., Tiezzi A., Rossi C.: „Morphological Anomalies in PollenTubes of *Actinidia deliciosa* (Kiwi) Exposed to 50 Hz Magnetic Field” *Bioelectromagnetics* Vol. 26, 2005, s.153-156
49. Davies M.S.: „Effects of 60 Hz Electromagnetic Fields on Early Growth in Three Plant Species and a Replication of Previous Results” *Bioelectromagnetics* Vol. 17, 1996, s.154-161
50. Dokumentacja elektromagnesu: model HF10-100VHT-B, SHI Doc. No.: CA1205-0035B
51. Dziwulska-Hunek A., Kornarzyński K., Matwijczuk A., Pietruszewski S., Szot B.: „Effect of laser and variable magnetic field simulation on amaranth seeds germination” *Int. Agrophysics* Vol. 23, 2009, s.229-235
52. Elahee K. B., Poinapen D.: „Effects of Static Magnetic Fields on Growth of *Paramecium caudatum*” *Bioelectromagnetics* Vol. 27, 2006, s.26-34
53. „Encyklopedia fizyki” PWN Warszawa 1972
54. Es'kov E. K., Darkov A.V.: „Consequences of High-Intensity Magnetic Effects on the Early Growth Processes in Plant Seeds and the Development of Honeybees” *Biology Bulletin*, Vol. 30, No. 5, 2003, s.512–516
55. Fischer G., Tausz M., Kock M., Grill D.: „Effects of Weak 16 and 2\3 Hz Magnetic Fields on Growth Parameters of Young Sunflower and Wheat Seedlings” *Bioelectromagnetics* Vol. 25, 2004, s.638-641
56. Florez M., Carbonell M. V., Martinez E.: „Early Sprouting and First Stages of Growth of Rice Seeds Exposed to a Magnetic Field” *Electromagnetic biology and medicine* Vol. 23, No. 2, 2004, s.157–166
57. Florez M., Carbonell M. V., Martinez E.: „Exposure of maize seeds to stationary magnetic fields: Effects on germination and early growth” *Environmental and Experimental Botany* Vol. 59, 2007, s.68–75
58. Frant M., Bujak K.: „Wpływ przedsiwnej stymulacji nasion zmiennym polem magnetycznym na jakość technologiczną ziarna pszenicy jarej uprawianej na glebie wytworzonej z lessu” *Acta Agrophysica*, Vol. 15(1), 2010, s.101-110

59. Frączek J., Kaczorowski J., Ślipek Z., Horabik J., Molenda M.: „*Standaryzacja metod pomiaru właściwości fizyczno–mechanicznych roślinnych materiałów ziarnistych*” Acta Agrophysica No. 92 Lublin 2003.
60. Galland P., Pazur A.: „*Magnetoreception in plants*” J Plant Res Vol. 118, 2005, s.371-389
61. Ginzo H. D., Decima E.E.: „*Weak static magnetic fields increase the speed of circumnutation in cucumber (Cucumis sativus L.) tendrils*” Birkhauser Verlag Basel 1995 s.1090-1093
62. Gonet B.: „*O możliwościach oddziaływania stałego pola magnetycznego na reakcje biologiczne*” Zagadnienia biofizyki współczesnej PWN Warszawa–Łódź 1984
63. Grundas S.: „*Charakterystyka właściwości fizycznych ziarniaków w kłosach pszenicy zwyczajnej*” Acta Agrophysica, No. 102 Lublin 2004
64. Hammond P.: „*Od Gilberta do Einsteina. Krótka historia elektromagnetyzmu*” Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej Częstochowa 1999
65. Hernandez Aguilar C., Dominguez-Pacheco A., Carballo Carballo A., Cruz-Orea A., Ivanov R., López Bonilla J. L., Montañez J. P. V.: „*Alternating magnetic field irradiation effects on three genotype maize seed field performance*” Acta Agrophysica, Vol. 14(1), 2009, s.7-17
66. Hirota N., Nakagawa J., Kitazawa K.: „*Effects of a magnetic field on the germination of plants*” Journal of applied physics Vol. 85, No.8, 1999, s.5717-5719
67. Hołyńska B., Ostachowicz B., Ostachowicz J.J., Ostrowski A., Ptasieński J., Węgrzynek D.: „*Analytical application of multifunctional systems of EDXRF*” J.Trace and Microprobe Tech Vol. 13(2), 1995, s.163-175
68. Hussain Ghulama, Al-Jaloud A.A.: „*Effect of irrigation and nitrogen on yield, yield components and water use efficiency of barley in Saudi Arabia*” Agricultural Water Management Vol. 36, 1998, s.55-70
69. Ibach H., Luth H.: „*Fizyka ciała stałego*” PWN Warszawa 1996
70. Jakubiec J., Jakubiec A., Zych Z.: „*Przewodnik do ćwiczeń z genetyki, hodowli roślin i nasiennictwa*” Skrypty SGGW Akademii Rolniczej w Warszawie Warszawa 1981
71. Janowski B.M.: „*Magnetyzm ziemski*” PWN Warszawa 1958
72. Jazbinsek V., Thiel G., Muller W., Wubbeler G., Trontelj Z.: „*Magnetic detection of injury-induced ionic currents in bean plants*” Eur Biophys Journal 29 Springer Verlag 2000 s.515-522
73. Kato R.: „*Effects of a Magnetic Field on the Growth of Primary Roots of Zea mays*” Plant Cell Physiol. Vol. 29(7), 1988, s.1215-1219
74. Kato R.: „*Effects of a Very Low Magnetic Field on the Gravitropic Curvature of Zea Roots*” Plant Cell Physiol. Vol. 31(4), 1990, s.565-568
75. Kimball G. C.: „*The growth of yeast in a magnetic field*” Laboratory of Bacteriology, College of Agriculture, Cornell University, Ithaca, New York 1937 s.109-121
76. Kittel Ch.: „*Wstęp do fizyki ciała stałego*” PWN Warszawa 1999

77. Klockenkamper R.: „*Total Reflection X-Ray Fluorescence Analysis*” Wiley New York 1997
78. Kobayashi M., Soda N., Miyo T., Ueda Y.: „*Effects of Combined DC and AC Magnetic Fields on Germination of Hornwort Seeds*” *Bioelectromagnetics* Vol. 25, 2004, s.552-559
79. Koningsberger D.C., Prins R.: „*Principles, applications, techniques of EXAFS, SEXAFS and XANES*” 1988 by John Wiley & Sons
80. Kordas L.: „*The Effect of Magnetic Field on Growth, Development and the Yield of Spring Wheat*” *Polish Journal of Environmental Studies* Vol. 11, No. 5, 2002, s.527-530
81. Kornarzyński K., Pietruszewski S.: „*Effect of stationary magnetic field on germination of wheat grain*” University of Agriculture Lublin 1998
82. Kornarzyński K., Pietruszewski S., Segit Z., Szwed-Urbaś K., Łacek R.: „*Wstępne badania wpływu stałego i zmiennego pola magnetycznego na szybkość wzrostu kielków pszenicy*” *Acta Agrophysica* Vol. 3(3), 2004, s.512-528
83. Kornarzyński K., Gładyszewska B., Pietruszewski S., Segit Z., Łacek R.: „*Ocena wpływu zmiennego pola magnetycznego na kielkowanie ziarniaków pszenicy twardej*” *Acta Agrophysica* Vol. 4(1), 2004, s.59-68
84. Kornarzyński K., Pietruszewski S.: „*Wpływ zmiennego pola magnetycznego na kielkowanie nasion o niskiej zdolności kielkowania*” *Acta Agrophysica* Vol. 11(2), 2008, s.429-435
85. Krawczyk A.: „*Bioelektromagnetyzm*” Polskie Towarzystwo Zastosowań Elektromagnetyzmu Instytut Naukowo-Badawczy ZTUREK Warszawa czerwiec 2002
86. Kuznetsov O.A., Hasenstein K.H.: „*Magnetophoretic induction of curvature in coleoptiles and hypocotyls*” *Journal of Experimental Botany*, Vol. 48, No. 316, 1997, s.1951-1957
87. Kyzioł K.: „*Wpływ parametrów procesu PA CVD na szybkość wzrostu i budowę warstw węglowych modyfikowanych azotem*”, Rozprawa Doktorska AGH, Kraków 2009
88. Kyzioł K., Tkacz-Śmiech K., Jonas S.: „*Wpływ parametrów procesu CVD na wzrost warstw a-C:N:H*” Zakopane 2005
89. Lamble K.J., Hill S.J.: „*Analyst*” Vol.123, 1998, s.103
90. Leelapriya T., Dhillip K.S., Sanker Narayan P. V.: „*Effect of Weak Sinusoidal Magnetic Field on Germination and Yield of Cotton (Gossypium spp.)*” *Electromagnetic biology and medicine* Vol. 22, No. 2 & 3, 2003, s.117-125
91. Lipiec J., Janas P., Barabasz W., Pysz M., Pisulewski P.: „*Effects of oscillating magnetic field pulses on selected oat sprouts used for food purposes*” *Acta Agrophysica* Vol. 5(2), 2005, s.357-365
92. Maheshwari B.L., Harsharn Singh Grewal: „*Magnetic treatment of irrigation water: Its effects on vegetable crop yield and water productivity*” *Agricultural Water Management* Vol. 96, 2009, s.1229-1236

93. Majd A., Shabrangi A., Bahar M., Abdi S.: „*Efect of AC and DC magnetic fields on seed germination and early vegetative growth in Brassica Napus L*” PIERS Proceedings, Moscow, Russia, August 18-21, 2009
94. Marinkovic V. B., Malesevic M., Crnobarac J., Schaller H. J., Gotz F., Roder O., Jacimovic G.: „*Die Wirkung elektromagnetischer Stimulation auf den Keimungsprozess von Weizen (Effect of electromagnetic stimulation on initial growth of wheat)*” *Gesunde Pflanzen*, Vol. 6, 2003, s.187-190
95. Marks N. Szecówka P.S.: „*Impact of variable magnetic field stimulation on growth of aboveground parts of potato plants*” *Int. Agrophysics* Vol. 24, 2010, s.165-170
96. Martinez E., Carbonell M. V., Amaya J.M.: „*A static magnetic field of 125 mT stimulates the initial growth stages of barley (Hordeum vulgare L.)*” *Electro- and magnetobiology* Vol. 19(3), 2000, s.271-277
97. Martinez E., Carbonell M. V., Amaya J.M.: „*Biological response of wheat (Triticum aestivum L.) of magnetic treatment*” *Agrolaser 2001* Oddziaływanie pól elektromagnetycznych na środowisko rolnicze Lublin 26 -28. 09.2001, s. 63-70
98. Martinez E., Carbonell M. V., Florez M.: „*Magnetic Biostimulation of initial growth stages of wheat (Triticum Aestivum, L.)*” *Electromagnetic biology and medicine* Vol. 21, No. 1, 2002, s.43-53
99. Martinez E., Carbonell M.V., Florez M., Maqueda R.: „*Effect of seed treatment by stationary magnetic field on the germination rate of pea (Pisum sativum)*” *Departamento de Fisica y Mecanica. E.T.S. Ingenieros Agronomos. Universidad Politecnica de Madrid, Madrid*
100. Martínez E., Carbonell M.V., Flórez M., Amaya J.M., Maqueda R.: „*Germination of tomato seeds (Lycopersicon esculentum L.) under magnetic field*” *Int. Agrophysics* Vol. 23, 2009, s.45-49
101. Maxwell J. C.: „*A Treatise on Electricity and Magnetism*”, Clarendon Press, Oxford 1873 (www.google.books.pl)
102. Meintjés G. D.: „*The use of HPLC for quality prediction of South African wheat cultivars*” *University of the Free State, Bloemfontein, 2004*
103. Monselise E. B.I., Parola A. H., Kost D.: „*Low-frequency electromagnetic fields induce a stress effect upon higher plants, as evident by the universal stress signal, alanine*” *Biochemical and Biophysical Research Communications* Vol. 302, 2003, s.427–434
104. Montgomery B.D.: „*The Magnetic and Mechanical Aspects of Resistive Superconducting System*” *John Wiley&Sons, 1969*
105. Moon P., Spencer D.E.: „*Teoria Pola*” *PWN Warszawa 1966*
106. Moon J., Chung H.: „*Acceleration of germination of tomato seed by applying AC electric and magnetic fields*” *Journal of Electrostatics* Vol. 48, 2000, s.103-114
107. Morejón L.P., Castro Palacio J.C, Velázquez Abad L., Govea A.P.: „*Stimulation of Pinus tropicalis M. seeds by magnetically treated water*” *Int. Agrophysics* Vol. 21, 2007, s.173-177

108. Muraji M., Nishimura M., Tatebe W., Fujii T.: „*Effect of Alternating Magnetic Field on the Growth of the Primary Root of Corn*” IEEE Transactions on magnetics, Vol. 28, No. 4, 1992, s.1996-2000
109. Nair I., Morgan M.G., Florig H.K.: „*Biological Effects of Power Frequency Electric and Magnetic Fields*”, U.S. Congress, Office of Technology Assessment, Biological Effects of Power Frequency Electric & Magnetic Fields—Background Paper, OTA-BP-E-53 (Washington, DC: U.S. Government Printing Office, May 1989)
110. Nałęcz M., Jaworski J.: „*Miernictwo magnetyczne*” PWN Warszawa 1968
111. Nimmi V., Madhu G.: „*Effect of pre-sowing treatment with permanent magnetic field on germination and growth of chilli (Capsicum annum. L.)*” Int. Agrophysics Vol. 23, 2009, s.195-198
112. Novitskaya G. V., Feofilaktova T. V., Kocheshkova T. K., Yusupova I. U., Novitskii Yu. I.: „*Changes in the composition and content of lipids in the leaves of radish plants of different magnetic orientation induced by weak permanent magnetic field*” Russian Journal of Plant Physiology Vol. 55, No. 4, 2008, s.486–495
113. Novitsky I. Yu., Novitskay G. V., Kocheshkova T. K., Nechiporenko G. A., Dobrovolskii M.V.: „*Growth of Green Onions in a Weak Permanent Magnetic Field*” Russian Journal of Plant Physiology, Vol. 48, No. 6, 2001, s.709–715
114. Ostachowicz B.: „*Zastosowanie zjawiska całkowitego odbicia promieniowania X w rentgenowskiej analizie fluoroscencyjnej*” Rozprawa doktorska Kraków 2010
115. Parsi N.: „*Electromagnetic effects on soybeans*” Master of Science Thesis University Of Missouri – Columbia 2007
116. Pazur A., Rassadina V., Dandler J., Zoller J.: „*Growth of etiolated barley plants in weak static and 50 Hz electromagnetic fields tuned to calcium ion cyclotron resonance*” BioMagnetic Research and Technology Vol. 4(1), 2006
117. Peake H.J, Davy N.: „*The magnetic field produced by uniformly magnetized ellipsoids of revolution*”, Br. J. Appl. Phys Vol. 4, 1953, s.207-209
118. Penuelas J., Llusia J., Martinez B., Fontcuberta J.: „*Diamagnetic Susceptibility and Root Growth Responses to Magnetic Fields in Lens culinaris, Glycine soja, and Triticum aestivum*” Electromagnetic biology and medicine Vol. 23 No. 2, 2004, s.97-112
119. Pieńkowska H., Grabowski S.: „*Wpływ słabych pól i promieniowania elektromagnetycznego na kiełkowanie i wzrost rzeżuchy*” Acta Agrophysica Vol. 6(1), 2005, s.205-212
120. Pietruszewski S.: „*Effects of magnetic biostimulation of wheat seeds on germination yield and proteins*” Int. Agrophysics Vol. 10, 1996, s.51-55
121. Pietruszewski S.: „*Magnetyczna biostymulacja materiału siewnego pszenicy jarej*” Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Lublinie Lublin 1999
122. Pietruszewski S., Kornarzyński K.: „*Wpływ pól magnetycznych na proces kiełkowania nasion*” Inżynieria Rolnicza Vol.2, 1999, s.13-19

123. Pietruszewski S., Kornarzyński K.: „*Magnetic biostimulation of wheat seeds*” Int. Agrophysics Vol. 13, 1999, s.497-501
124. Pietruszewski S.: „*Influence of pre-sowing magnetic biostimulation on germination and yield of wheat*” Int. Agrophysics Vol. 13, 1999, s.241-244
125. Pietruszewski S.: „*Wpływ pola magnetycznego na plony buraka cukrowego odmian Kalwia i Polko*” Inżynieria Rolnicza Vol. 5, 2000
126. Pietruszewski S., Kornarzyński K.: „*Wpływ przedsięwziętego oddziaływania pola magnetycznego na właściwości chemiczne i technologiczne pszenicy*” Inżynieria Rolnicza Vol. 5, 2000
127. Pietruszewski S.: „*Magnetyczna i elektryczna biostymulacja nasion roślin uprawnych*” Agrolaser 2003 Oddziaływanie pól elektromagnetycznych na środowisko rolnicze Lublin 08 -19. 09.2003 s.63-69
128. Pietruszewski S., Muszyński S., Dziwulska A.: „*Electromagnetic fields and electromagnetic radiation as non-invasive external stimulants for seeds (selected methods and responses)*” Int. Agrophysics Vol. 21, 2007, s.95-100
129. Pietruszewski S., Kania K.: „*Effect of magnetic field on germination and yield of wheat*” Int. Agrophysics Vol. 24, 2010, s.297-302
130. Pietrzyk W.: „*Pomiar przenikalności dielektrycznej cząstek o kształcie sferoidy wydłużonej*” II SPETP 1986 s.367-373
131. Pietrzyk W.: „*Electric field influence on grain*” Acta Agrophysica Vol. 5, 1996
132. Pietrzyk W., Horyński M., Ścibisz M.: „*Influence of electrostriction forces of energy consumption of drying grain seeds in a drum drier*” Int. Agrophysics Vol. 10, 1996, s.63-67
133. Pietrzyk W., Horyński M., Ścibisz M.: „*The electric field influence on drying curves of grain seeds in a fluidar layer*” Int. Agrophysics Vol. 10, 1996, s.57-61
134. Pietrzyk W., Grundas S., Horyński M., Sumorek A.: „*Wykorzystanie pola elektrostatycznego i ozonu do obniżania energochłonności procesu suszenia ziarna zbóż*” Acta Agrophysica Vol. 16 Lublin 1998
135. Pietrzyk W., Sumorek A.: „*Influence of electric field on wheat grain drying*” Int. Agrophysics Vol. 13, 1999, s.249-250
136. Pilawski A.: „*Podstawy biofizyki*” PZWL Warszawa 1977
137. Piskorz-Bińczycka B., Fiema J., Nowk M.: „*Effect of the magnetic field on the biological clock in penicillium claviforme*” Acta biologica Cracoviensia Series Botanica Vol. 45(2), 2003, s.111-116
138. Podleśny J., Pietruszewski S., Podleśna A.: „*Efficiency of the magnetic treatment of broad bean seeds cultivated under experimental plot conditions*” Int. Agrophysics Vol. 18, 2004, s.65-71
139. Podleśny J.: „*Wpływ stymulacji magnetycznej nasion na wzrost, rozwój i plonowanie roślin uprawnych*” Acta Agrophysica Vol. 4(2), 2004, s.459-473

140. Podleśny J., Podleśna A.: „*Wpływ traktowania nasion polem magnetycznym na wzrost, rozwój i dynamikę gromadzenia masy bobiku (vicia faba minor)*” Acta Agrophysica Vol. 4(3), 2004, s.787-801
141. Podleśny J., Misiak L.E., Podleśna A., Pietruszewski S.: „*Concentration of free radicals in pea seeds after pre-sowing treatment with magnetic field*” Int. Agrophysics Vol. 19, 2005, s.243-249
142. Podleśny J., Pietruszewski S., Podleśna A.: „*Influence of magnetic stimulation of seeds on the formation of morphological features and yielding of the pea*” Int. Agrophysics Vol. 19, 2005, s.1-8
143. Podleśny J., Pietruszewski S.: „*Wpływ traktowania nasion polem magnetycznym na wzrost, rozwój i dynamikę gromadzenia masy łubinu białego (lupinus albus L.)*” Inżynieria Rolnicza Vol. 6, 2006, s.169-176
144. Podleśny J., Pietruszewski S.: „*Rola stymulacji magnetycznej nasion w kształtowaniu odporności roślin bobiku na niedobór wody w podłożu glebowym*” Acta Agrophysica Vol. 9(2), 2007, s.449-458
145. Podleśny J., Pietruszewski S.: „*Wpływ stymulacji magnetycznej nasion na wzrost i plonowanie grochu siewnego uprawianego przy różnej wilgotności gleby*” Inżynieria Rolnicza Vol. 8(96), 2007, s.207-212
146. Podleśny J., Gendarz M.: „*Wpływ wody uzdatnionej magnetycznie na wzrost, rozwój i plonowanie dwóch genotypów grochu siewnego*” Acta Agrophysica Vol. 12(3), 2008, s.767-776
147. Podsiadło C., Leśniak E.: „*Wpływ wody uzdatnionej magnetycznie na wartość siewną nasion i wzrost wybranych gatunków roślin*” Inżynieria Rolnicza Vol. 5(103), 2008, s.195-200
148. Polk Ch., Fellow L.: „*Biological Effects of Low-Level Low-Frequency Electric and Magnetic Fields*” IEEE Transactions on education Vol. 34, No. 3, 1991, s.243-249
149. Polska Norma, PN – 79/R–65950: „*Materiał siewny. Metody badania nasion*”
150. Presman A.S.: „*Pole magnetyczne a żywa przyroda*” Warszawa PWN 1971
151. Qadri S. M. H., Dhahira Beevi N., Manti A., Leelapriya T., Dhillip K. S., Snkar Narayan P. V.: „*Sinusoidal Magnetic Fields and Chawki (Silkworm) Rearing in Sericulture*” Electromagnetic Biology and Medicine Vol. 25, 2006, s.145-153
152. Quantum Design.: „*Vibrating Sample Magnetometer (VSM) Option User's Manual*” USA (2004)
153. Racuciu M., Creanga D., Horga I.: „*Plant growth under static magnetic field influence*” Romanian Journal of Physics, Vol. 53, 2008, s.331-336
154. Racuciu M., Calugaru GH., Creanga D. E.: „*Static magnetic field influence on some plant growth*” Romanian Journal of Physics, Vol. 51, 2008, s.245-251
155. Rajendra P., Sujatha Nayak H., Sashidhar R. B., Subramanyam C., Devendranath D., Gunasekaran B., Aradhya R. S. S., Bhaskaran A.: „*Effects of Power Frequency Electromagnetic Fields on Growth of Germinating Vicia faba L., the Broad Bean*” Electromagnetic Biology and Medicine Vol. 24, 2005, s.39-54

156. Ravel B.: „*Introduction to EXAFS Experiments and Theory*”, Version 0.02 May 2, 2000
157. Reina F. G., Pascual L. A., Fundora I. A.: „*Influence of a Stationary Magnetic Field on Water Relations in Lettuce Seeds. Part II: Experimental Results*” *Bioelectromagnetics* Vol. 22, 2001, s.596-602
158. Reina F. G., Pascual L. A.: „*Influence of a Stationary Magnetic Field on Water Relations in Lettuce Seeds. Part I: Theoretical Considerations*” *Bioelectromagnetics* Vol. 22, 2001, s.589-595
159. Rochalska M. Grabowska K.: „*Influence of magnetic fields on the activity of enzymes: α - and β -amylase and glutathione S-transferase (GST) in wheat plants*” *Int. Agrophysics*, Vol. 21, 2007, s.185-188
160. Rochalska M. Orzeszko-Rywka A.: „*Influence of alternating magnetic field on respiration of sugar beet seeds*” *Int. Agrophysics* Vol. 22, 2008, s.255-259
161. Rosen A. D.: „*Studies on the effect of static magnetic fields on biological systems*” *Piers Online*, Vol. 6, No. 2, 2010, s.133-136
162. Rybiński W., Pietruszewski S., Kornarzyński K.: „*Influence of magnetic field with chemomutagen and gamma rays on the variability of yielding parameters in barley (*Hordeum vulgare* L.)*” *Int. Agrophysics* Vol. 17, 2003, s.85-91
163. Rybiński W., Pietruszewski S., Kornarzyński K.: „*Analiza wpływu pola magnetycznego i promieni gamma na zmienność elementów plonowania jęczmienia jarego (*Hordeum vulgare* L.)*” *Acta Agrophysica* Vol. 3(3), 2004, s.579-591
164. Sakhnini L.: „*Influence of Ca^{2+} in biological stimulating effects of AC magnetic fields on germination of bean seeds*” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* Vol. 310, 2007, s.1032-1034
165. Shabangi A., Majd A.: „*Effect of magnetic fields on growth and antioxidant systems in agricultural plants*” *PIERS Proceedings*, Beijing, China, March 23-27, 2009, s.1142-1147
166. Sikora M.: „*Magnetyzm związków $La_{2/3-y}REyCa_{1/3}MnO_3$ badany metodą magnetycznego dichroizmu promieniowania X*” *Rozprawa doktorska*, AGH Kraków 2002
167. Sikora M.: „*X-Ray Absorption Spectroscopy*”, Scootmo Presentation, Oxford 2003
168. Sikora R.: „*Teoria pola elektromagnetycznego*” *WNT Warszawa* 1998
169. **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
170. **Skowron M.**: „*Biostymulacja nasion lnianki silnym stałym polem magnetycznym*” *WD 2009 Warsztaty doktoranckie: Krynica Zdrój 5-8 września 2009.*
171. **Skowron M.**: „*Biostymulacja nasion lnianki silnym stałym polem magnetycznym*” *Prace Instytutu Elektrotechniki* Vol. 56, No. 243, 2009, s.149-170

172. **Skowron M.:** „*Obliczanie pola magnetycznego dla sferoidy spłaszczonej w układzie współrzędnych prostokątnych*” Warsztaty Doktoranckie : Lublin, 24–27 czerwca 2010
173. Soja G., Kunsch B., Gerzabek M., Reichenauer T., Soja A. M., Ripper G.: „*Growth and Yield of Winter Wheat (Triticum aestivum L.) and Corn (Zea mays L.) Near a High Voltage Transmission Line*” *Bioelectromagnetics* Vol. 24, 2003, s.91-102
174. Souza A., Garcia D., Sueiro L., Gilart F., Porrás E., Licea L.: „*Pre-Sowing Magnetic Treatments of Tomato Seeds Increase the Growth and Yield of Plants*” *Bioelectromagnetics* Vol. 27, 2006, s.247-257
175. Staselis A., Duchovskis P., Brazaityte A.: „*Impact of electromagnetic fields on morphogenesis and physiological indices of tomato*” *Int. Agrophysics* Vol. 18, 2004, s.277-283
176. Steinberg A.: „*Biomagnetics: Effects on transcription associated with Adh/GUS and Adh/GFP promoter-reporter systems in Arabidopsis due to static magnetic fields up to 9T*” Duke University 2002
177. Stratton J. A.: „*Elektromagnetic Theory*”, New York, McGraw Hill 1941
178. Sujak A., Dziwulska-Hunek A., Kornarzyński K.: „*Compositional and nutritional values of amaranth seeds after pre-sowing He-Ne laser light and alternating magnetic field treatment*” *Int. Agrophysics* Vol. 23, 2009, s.81-86
179. Szecówka P.: „*Wpływ stymulacji sadzeniaków polem elektromagnetycznym na przebieg wegetacji ziemniaka*” rozprawa doktorska Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Kraków 2008
180. Szumiło G., Rachoń L.: „*Oddziaływanie fal elektromagnetycznych na plonowanie oraz jakość nagoziarnistych i oplewionych odmian jęczmienia jarego i owsa*” *Acta Agrophysica* Vol. 8(2), 2006, s.501-508
181. Takeda Shin-Ichi, Nishijima S.: „*Development of magnetic separation of water-soluble material using superconducting magnet*” *IEEE Transaction on applied superconductivity* Vol.17, No. 2, 2007, s.2178-2180
182. Takimoto K., Yaguchi H., Miyakoshi J.: „*Extremely low frequency magnetic fields suppress the reduction of germination rate of arabidopsis thaliana seeds kept in saturated Humidity*” *Biosci. Biotechnol. Biochem.* Vol. 65(11), 2001, s.2552-2554
183. Tejdor M., Rubio H., Elbaile L., Iglesias R.: „*External fields created by uniformly magnetized ellipsoids and spheroids*” *IEEE Transactions on Magnetics* Vol 31, 1995, s.830-836.
184. Tomaszewicz W., Ciesielski P.: „*Elektryczność i Magnetyzm*” Politechnika Gdańska 2002
185. Tomaszewicz W., Grygiel P.: „*Podstawy fizyki*” Politechnika Gdańska 2002
186. Tomson A.C., Vaughan D., Attwood D.T., Gullikson E. M., Howells M. R., Kortright J. B., Robinson A. L., Underwood J. H., Kwang-Je Kim, Kirz J., Lindau I., Pianetta P., Winick H., Williams G. P., Scofield J. H.: „*X-Ray Data Booklet*” University of California, Berkeley, January 2001

187. Ueno S.: „*Biological effects of magnetic fields*” IEEE Translation journal on magnetics in Japan Vol. 7, No.7, 1992, s.580-585
188. Ueno S.: „*Commission K: Electromagnetics in biology and medicine*”
189. Vashisth A., Nagarajan S.: „*Effect on germination and early growth characteristics in sunflower (*Helianthus annuus*) seeds exposed to static magnetic field*” Journal of Plant Physiology Vol. 167, 2010, s.149–156
190. Wadas R.: „*Magnetyzm molekuł biologicznych*” Zagadnienia biofizyki współczesnej PWN Warszawa-Lódź 1977
191. Wadas R.: „*Biomagnetyzm*” PWN Warszawa 1978
192. Wert Ch.A, Thomson M.: „*Fizyka Ciała Stałego*” PWN Warszawa 1974
193. Włodek R., Prochownik A.: „*Obliczanie pól elektrycznych w układach elektroizolacyjnych*” Skrypty uczelniane Wydawnictwo AGH Kraków 1992
194. Wojtusiak R.J., Majlert Z.: „*Geomagnetobiologia wpływ pola magnetycznego Ziemi na organizmy żywe*” Nauka dla wszystkich Vol. 445 WPAN Kraków 1992
195. Wójcik S.: „*Plonowanie i jakość korzeni kilku odmian buraka cukrowego w zależności od sposobu przedsewnej biostymulacji nasion*” Agrolaser 2001 Oddziaływanie pól elektromagnetycznych na środowisko rolnicze Lublin 26 -28. 09.2001, s.113-120
196. Yano A., Hidaka E., Fujiwara K., Iimoto M.: „*Induction of Primary Root Curvature in Radish Seedlings in a Static Magnetic Field*” Bioelectromagnetics Vol. 22, 2001, s.194-199
197. Yano A., Ohashi Y., Hirasaki T., Fujiwara.: „*Effects of a 60 Hz Magnetic Field on Photosynthetic CO₂ Uptake and Early Growth of Radish Seedlings*” Bioelectromagnetics Vol. 25, 2004, s.572-581
198. Yaycili O., Alikamanoglu S.: „*The effect of magnetic field on Paulownia tissue cultures*” Plant Cell, Tissue and Organ Culture Vol. 83, 2005, s.109–114
199. Yinana Y., Yuanc L., Yongqinga Y., Chunyanga L.: „*Effect of seed pretreatment by magnetic field on the sensitivity of cucumber (*Cucumis sativus*) seedlings to ultraviolet-B radiation*” Environmental and Experimental Botany Vol. 54, 2005, s.286–294
200. Zepeda-Bautista R., Hernández-Aguilar C., Domínguez-Pacheco A., Cruz-Orea A., Godina-Nava J.J, Martínez-Ortíz E.: „*Electromagnetic field and seed vigour of corn hybrids*” Int. Agrophysics Vol. 24, 2010, s.329-332
201. Zhadin M. N.: „*Review of Russian Literature on Biological Action of DC and Low-Frequency AC Magnetic Fields*” Bioelectromagnetics Vol. 22, 2001, s.27-45
202. Zon J.: „*Bioplazma i plazma fizyczna w układach żywych. Studium przyrodnicze oraz filozoficzne*” Lublin 2000
203. <http://www-hasyllab.desy.de>
204. <http://www.magnesy.pl/>