

# AUTOREFERAT

przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych

**dr Mateusz Suchanek**

Katedra Gleboznawstwa i Agrofizyki  
Wydział Rolniczo-Ekonomiczny  
Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

Kraków, 2020



## Spis treści

1. Dane osobowe .....	4
2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe.....	5
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.....	5
4. Osiągnięcie naukowe stanowiące podstawę postępowania habilitacyjnego .....	5
4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego .....	5
4.2 Wykaz publikacji naukowych będących podstawą osiągnięcia naukowego .....	5
4.3 Omówienie osiągnięcia naukowego .....	7
4.3.1 Wprowadzenie i cel badań.....	7
4.3.2 Ocena jakości owoców metodą niskopolewego MRI .....	9
4.3.3 Badanie transportu wody w drewnie metodą niskopolewego MRI.....	15
4.3.4 Zastosowanie niskopolewego obrazowania MR do oceny wpływu impulsowego pola elektrycznego na elektroporację błony komórkowej.....	18
4.3.5 Badanie procesu odwodnienia osmotycznego w tkankach roślinnych metodą niskopolewego MRI .....	20
4.3.6 Podsumowanie.....	22
4.3.7 Literatura .....	24
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowych.....	29
5.1 Praca naukowa w okresie przed uzyskaniem stopnia doktora.....	32
5.2 Praca naukowa w okresie po uzyskaniu stopnia doktora .....	32
6. Osiągnięcia dydaktyczne, organizacyjne oraz popularyzujące naukę.....	34
6.1 Działalność dydaktyczna.....	34
6.2 Osiągnięcia organizacyjne i popularyzujące naukę.....	34
7. Nagrody i wyróżnienia .....	35



## 1. Dane osobowe

Imię i Nazwisko: Mateusz Suchanek  
ORCID ID: 0000-0002-8187-4003  
Researcher ID: H-4207-2014

## 2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

**13.06.2000** – dyplom magistra fizyki nadany przez Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie. Tytuł pracy magisterskiej: „Polaryzacja jądrowa  $^3\text{He}$  do aplikacji medycznych”. Promotor: prof. dr hab. Tomasz Dohnalik.

**29.09.2005** – dyplom doktora nauk fizycznych nadany uchwałą Rady Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie. Tytuł rozprawy doktorskiej: „Tomograf magnetycznego rezonansu jądrowego do obrazowania z użyciem hiperspolaryzowanego  $^3\text{He}$ ”. Promotor: prof. dr hab. Tomasz Dohnalik.

## 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

**2005 – 2007:** Zakład Fizyki, Wydział Rolniczo-Ekonomiczny, Akademia Rolnicza im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, asystent.

**2007 – 2020:** Katedra Gleboznawstwa i Agrofizyki<sup>1</sup>, Wydział Rolniczo-Ekonomiczny, Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, adiunkt.

**2020 – do chwili obecnej:** Katedra Gleboznawstwa i Agrofizyki, Wydział Rolniczo-Ekonomiczny, Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, profesor nadzwyczajny UR.

## 4. Osiągnięcie naukowe stanowiące podstawę postępowania habilitacyjnego

### 4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie naukowe wynikające z art. 219 ust. 1 pkt. 2b ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.) wskazuję cykl powiązanych tematycznie pięciu publikacji [H1 - H5] zatytułowany:

***"Zastosowanie nikopolowego obrazowania magnetyczno rezonansowego do badania rozkładu i funkcji wody w wybranych produktach pochodzenia roślinnego"***

### 4.2 Wykaz publikacji naukowych będących podstawą osiągnięcia naukowego

[H1] Suchanek M., Olejniczak Z. Ocena jakości jabłek za pomocą Niskopolowej Tomografii Magnetyczno-Rezonansowej. (2008) Acta Agrophysica, 12, 183-190.

Praca z poza listy JCR. MNiSW<sub>2013\_2016</sub> = 14 pkt., MNiSW<sub>po 2019</sub> = 20 pkt.,

---

<sup>1</sup> wcześniejsze nazwy: Zakład Fizyki (do 2009 r.); Katedra Chemii i Fizyki (2009–2014), Instytut Chemii i Fizyki (2014–2019), Instytut Gleboznawstwa i Agrofizyki (2019 r.)

*Mój wkład w powstanie pracy jest większościowy. Zaplanowałem koncepcję badań. Przygotowałem materiał do badań. Wykonałem badania magnetyczno rezonansowe. Przeprowadziłem całościową analizę i dyskusję wyników. Przygotowałem tekst i grafiki artykułu. Wysłałem tekst do redakcji i odpowiedziałem na sugestie i zarzuty recenzentów.<sup>2</sup>*

[H2] **Suchanek M.**, Kordulska M., Olejniczak Z., Figiel H., Turek. K. Application of low-field MRI for quality assessment of 'Conference' pears stored under controlled atmosphere conditions. (2017) *Postharvest Biology and Technology*, 124, 100-106.

IF<sup>3</sup><sub>2017</sub> = 3.112, MNiSW<sub>2013\_2016</sub> = 40 pkt., MNiSW<sub>po 2019</sub> = 140 pkt., liczba cytowań = 11

*Mój wkład w powstanie pracy jest większościowy. Zaplanowałem koncepcję badań. Przygotowałem materiał do badań, łącznie z przechowywaniem w warunkach kontrolowanej atmosfery. Miałem decydujący udział w wykonaniu badań magnetyczno rezonansowych. Przeprowadziłem całościową analizę i dyskusję wyników. Przygotowałem tekst i grafiki artykułu. Korespondowałem z edytorem czasopisma i prowadziłem dyskusję wyników pracy z recenzentami.*

[H3] **Suchanek M.**, Olejniczak Z. Visualization of fluid flow pathways in wood by low-field <sup>1</sup>H and <sup>3</sup>He contrast MRI. (2015) *International Journal of Multiphase Flow* 72, 83-87.

IF<sub>2015</sub> = 2.250, MNiSW<sub>2013\_2016</sub> = 40 pkt., MNiSW<sub>po 2019</sub> = 100 pkt., liczba cytowań = 2

*Mój wkład w powstanie pracy jest większościowy. Zaplanowałem koncepcję badań. Przygotowałem materiał do badań, łącznie ze spolaryzowaniem gazu <sup>3</sup>He. Zaprojektowałem i wykonałem stanowisko do badania przepływu in-situ w magnezie tomografu. Wykonałem badania magnetyczno rezonansowe. Przeprowadziłem całościową analizę i dyskusję wyników. Przygotowałem tekst i grafiki artykułu. Korespondowałem z edytorem czasopisma i prowadziłem dyskusję wyników pracy z recenzentami.*

[H4] **Suchanek M.**, Olejniczak Z. Low field MRI study of the potato cell membrane electroporation by pulsed electric field. (2018) *Journal of Food Engineering*, 231, 54-60.

IF<sub>2018</sub> = 3.625, MNiSW<sub>2013\_2016</sub> = 40 pkt., MNiSW<sub>po 2019</sub> = 140 pkt., liczba cytowań = 4

*Mój wkład w powstanie pracy jest większościowy. Zaplanowałem koncepcję badań. Przygotowałem materiał do badań. Przeprowadziłem eksperyment z impulsowym polem elektrycznym. Wykonałem badania magnetyczno rezonansowe. Wykonałem badania mechaniczne, oraz pomiary przewodności elektrycznej. Przeprowadziłem całościową analizę i dyskusję wyników. Przygotowałem całość tekstu i grafiki artykułu. Korespondowałem z edytorem czasopisma i prowadziłem dyskusję wyników pracy z recenzentami.*

[H5] **Suchanek M.**, Olejniczak Z. Evaluation of Osmotic Dehydration Process in Plant Tissue with Low-Field Magnetic Resonance Imaging Enhanced with Paramagnetic Ions.

---

<sup>2</sup> Oświadczenia wszystkich współautorów określające indywidualny wkład każdego z nich w powstanie publikacji stanowią załącznik 6 wniosku.

<sup>3</sup> Impact Factor podany zgodnie z rokiem opublikowania na podstawie Journal Citation Reports (Clarivate Analytics). Liczba cytowań na dzień 22 listopada 2020 r. na podstawie Web of Science (Clarivate Analytics).

(2020) Processes 8, 887.

IF<sub>2019</sub> = 2.753, MNiSW<sub>2013\_2016</sub> = -- pkt., MNiSW<sub>po 2019</sub> = 70 pkt., liczba cytowań = 0

*Mój wkład w powstanie pracy jest większościowy. Zaplanowałem koncepcję badań. Przygotowałem materiał do badań. Wykonałem badania magnetyczno rezonansowe oraz badania metodą wagową. Przeprowadziłem całościową analizę i dyskusję wyników. Przygotowałem całość tekstu i grafiki artykułu. Korespondowałem z edytorem czasopisma i prowadziłem dyskusję wyników pracy z recenzentami.*

Sumaryczny IF prac stanowiących osiągnięcie naukowe zgodnie z rokiem opublikowania wynosi **11,74**. Badania opisane w pracy [H4] były współfinansowane ze środków NCN nr projektu: 2017/01/X/NZ9/00704.

### **4.3 Omówienie osiągnięcia naukowego**

Cytowania zawarte w tym podrozdziale i oznaczone jako [H1–H5], odnoszą się do oznaczeń wprowadzonych w podrozdziale 4.2.

#### **4.3.1 Wprowadzenie i cel badań**

Przedmiotem osiągnięcia w myśl ustawy jest cykl publikacji powiązanych tematycznie wymienionych w punkcie 4.2 (stanowiących Załącznik 6). W ramach prezentowanego cyklu publikacji przedstawiłem i omówiłem wyniki, które dotyczyły zastosowania niskopolewego obrazowania magnetyczno-rezonansowego (MRI, *ang. Magnetic Resonance Imaging*) do oceny jakości wybranych owoców i warzyw oraz do badania transportu wody i substancji rozpuszczonych w produktach pochodzenia roślinnego.

Obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego to technika, która powszechnie jest używana w medycynie do badania struktury tkanki miękkiej jako narzędzie do diagnostyki klinicznej. Niemniej jednak rezonans magnetyczny okazał się także doskonałym narzędziem analitycznym w badaniach inżynierskich ze względu na swoją dokładność i wszechstronność. Nieinwazyjny, nieniszczący charakter metody oraz możliwość gromadzenia danych jakościowych i ilościowych dotyczących właściwości fizycznych i chemicznych szerokiej gamy próbek sprawiły, że metoda MRI stała się również popularna w zastosowaniach związanych z produktami rolnymi [1–3]. Obrazowanie MR ma liczne zastosowania w rolnictwie, leśnictwie i ogrodnictwie, ponieważ woda jest podstawowym budulcem tkanki biologicznej. Wysoka czułość (pod względem różnic w kontraście), opcje obrazowania wielopłaszczyznowego (bez repozycjonowania badanego produktu) i stosunkowo krótkie czasy akwizycji, są dodatkowymi, niewątpliwymi zaletami tej techniki. Znajomość wewnętrznej mikrostruktury produktów rolnych i związanego z tą mikrostrukturą transportu wody, czy też substancji rozpuszczonych jest interesująca w wielu zastosowaniach przed i po zbiorach. Typowymi przykładami są analiza rozwoju tkanki podczas wzrostu [4], ocena fizycznego uszkodzenia tkanki [5], zabiegi po zbiorcze mające na celu poprawę jakości i trwałości produktu (np. obróbka cieplna, przechowywanie) [6, 7], przetwarzanie produktów (np. suszenie, zamrażanie) [8] oraz ocena jakości online do celów sortowania [9], i wiele innych [10]. W tym kontekście podjęta przeze mnie tematyka badań jest zarówno interesująca jak i aktualna.

Ogólnie, zjawisko magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR, *ang. Nuclear Magnetic Resonance*), w skrócie zjawisko rezonansu magnetycznego (MR, *ang. Magnetic Resonance*), zachodzi dla jąder atomowych o niezerowym spinie (najpowszechniej jądra wodoru wchodzące w skład wody) i polega na oddziaływaniu pomiędzy magnetycznym momentem jądrowym, a stałym zewnętrznym polem magnetycznym. Do rezonansu dochodzi wówczas, gdy jądra posiadające magnetyczne momenty jądrowe, umieszczone w zewnętrznym polu magnetycznym, zaabsorbują promieniowanie elektromagnetyczne wynikające z przyłożenia dodatkowego, zmiennego pola elektromagnetycznego o ściśle określonej częstotliwości, charakterystycznej dla danego pierwiastka i zależnej od indukcji stałego pola magnetycznego. Obrazowanie MR jest rozwinięciem metody MR umożliwiającym przestrzenną lokalizację sygnałów rejestrowanych z próbki. Ideą techniki MRI jest zastosowanie dodatkowych impulsowych gradientów pól magnetycznych. W rezultacie częstotliwość rezonansowa staje się liniową funkcją położenia. Metoda MRI umożliwia zatem przestrzenne kodowanie informacji o zachowaniu się wody znajdującej się w określonym miejscu w badanej próbce [11].

Obrazowanie MR pozwala na wizualizację zarówno przestrzennego rozkładu wody, jak również wielu cech morfologicznych całej próbki i jej funkcji. Zależy to od wyboru metody stosowanej do rejestracji sygnału. W technice MRI, w wyniku przyłożenia zmiennego pola magnetycznego o częstości rezonansowej naruszony zostaje stan równowagi. Wzbudzone jądra rezonansowe będą jednak powracały do stanu wyjściowego, a procesem odpowiedzialnym za to zjawisko jest relaksacja. Dwa podstawowe procesy relaksacji to relaksacja podłużna opisywana czasem  $T_1$  oraz relaksacja poprzeczna opisana czasem  $T_2$ . Proces relaksacji podłużnej jest związany z wymianą energii między układem jąder a otoczeniem, zwanym siecią. Często z tego powodu używane jest określenie relaksacja spin-sieć. Relaksacja poprzeczna jest procesem, w wyniku którego następuje wymiana energii jąder rezonansowych pomiędzy sobą. Stąd też nazywana jest relaksacją spin-spin. Opisane zjawiska powodują, że obrazy MR mogą nieść informację nie tylko o gęstości mierzonego składnika, ale także informację zależną od chemicznego otoczenia jąder (zależność  $T_1$ ) i/lub od stopnia ruchliwości samych jąder w próbce (zależność  $T_2$ ).

Sygnał MRI, a tym samym rozdzielczość obrazów będąca miarą zdolności wyodrębniania szczegółów, jest w metodzie MRI bezpośrednio powiązany z wartością indukcji pola magnetycznego. Urządzenia MRI spotykane w placówkach medycznych, wyposażone są w magnesy nadprzewodzące o wysokiej indukcji pola magnetycznego, przekraczającej wartość 1.0 T. Są to systemy duże i skomplikowane o wysokich kosztach eksploatacyjnych. Ponadto warunkiem koniecznym do prawidłowego funkcjonowania takiego urządzenia MRI jest zapewnienie dedykowanego miejsca z konkretną instalacją chłodniczą (co jest związane z ingerencją w konstrukcję budynku) oraz wyszkolonego personelu. Z tych powodów wysokopoleowe obrazowanie MR, poza zastosowaniami klinicznymi, jest postrzegane jako kosztowne i niewygodne narzędzie badawcze o ograniczonym dostępie dla większości zastosowań praktycznych. Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie tanich magnesów stałych o indukcji nieprzekraczającej wartości 0.2 T, jako źródła pola magnetycznego w urządzeniach MRI, zamiast magnesów nadprzewodzących wymagających aparatury



kriogenicznej. Tego typu aparaty MRI zapewniają niskie, ale wystarczająco jednorodne pole magnetyczne, do obrazowania podstawowych cech morfologicznych. Wykorzystanie niskopoleowego systemu MRI, nie jest wolne od ograniczeń. Głównym problemem jest utrata czułości i rozdzielczości wynikająca z zastosowania niskiego pola magnetycznego. Stąd też, mikro-złożoność próbki eliminuje ją z zastosowań metody niskopoleowej [12]. Niemniej jednak, ograniczone rozmiary niskopoleowych urządzeń MRI, ich niskie koszty instalacji i eksploatacji oraz większa mobilność i łatwość w obsłudze, otwierają nowe możliwości w zakresie badań obrazowych. W szczególności, wykorzystanie niskopoleowych aparatów MRI jako praktycznego narzędzia analitycznego, do licznych zastosowań pozamedycznych, w tym rolniczych. Dedykowany niskopoleowy system MRI pozwala na wykonanie szerokiego zakresu pomiarów, które nie tylko mogą pomóc w ocenie parametrów związanych z jakością, czy dojrzałością owoców, warzyw i ziaren, ale również dają szansę na zrozumienie podstawowych zjawisk i procesów fizjologicznych zachodzących w czasie, bez ingerencji w próbkę. O potencjale metody niskopoleowej niewątpliwie świadczą systematycznie pojawiające się badania, w których niskopoleowe urządzenia MRI dostarczają nie tylko opisu procesów, ale również charakterystyki właściwości fizycznych roślin i płodów rolnych podczas zbioru, transportu, przechowywania, czy też przetwarzania [13].

Głównym celem moich badań, podjętych w ramach przedstawionego cyklu prac [H1 – H5] było określenie możliwości zastosowania niskopoleowego obrazowania MR do badania wybranych produktów pochodzenia roślinnego. W szczególności:

- do oceny cech morfologicznych jabłek i gruszek na różnych etapach przechowywania i przygotowania do sprzedaży, w tym analiza ilościowa występujących zaburzeń mięszu, a także badanie dynamiki procesów chorobowych podczas przechowywania [H1, H2];
- do obrazowania kanałów przepływu wody w różnych gatunkach drewna o niejednorodnej budowie [H3],
- do oceny wpływu impulsowego pola elektrycznego na elektroporację błony komórkowej bulwy ziemniaka, w tym analiza ilościowa uszkodzeń tkanki roślinnej w zależności od parametrów impulsowego pola elektrycznego [H4],
- do badania kinetyki procesu odwadniania osmotycznego w tkance cukinii [H5].

W przedstawionym cyklu prac wykorzystano niskopoleowe urządzenia MRI o wartości indukcji wynoszącej 0.088 T i 0.2 T, do których miałem dostęp w ramach istniejącej współpracy pomiędzy Uniwersytetem Rolniczym im. H. Kołłątaja, a odpowiednio Uniwersytetem Jagiellońskim oraz Akademią Górniczo Hutniczą w Krakowie.

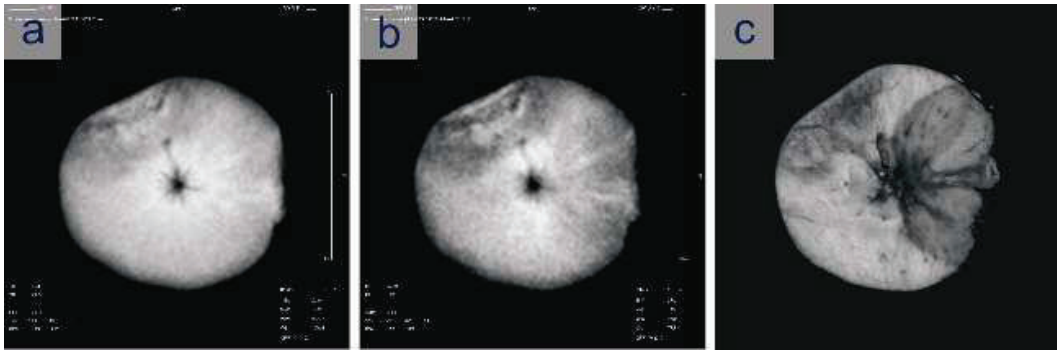
#### **4.3.2 Ocena jakości owoców metodą niskopoleowego MRI**

Wymagania dotyczące jakości produktów rolnych i spożywczych są bardzo wysokie. Ocenę jakości można przeprowadzić poprzez zbadanie zewnętrznych cech fizycznych takich jak: wielkość, kolor, świeżość, czy też wszelkie uszkodzenia i wady powierzchniowe. Jednak często czynniki wewnętrzne takie jak: struktura, tekstura, wartość odżywcza oraz uszkodzenia i wady wewnętrzne są kluczowymi punktami w ocenie jakości produktów rolnych i spożywczych. Biorąc pod uwagę fakt, że łańcuch dystrybucyjny obejmuje szereg etapów,

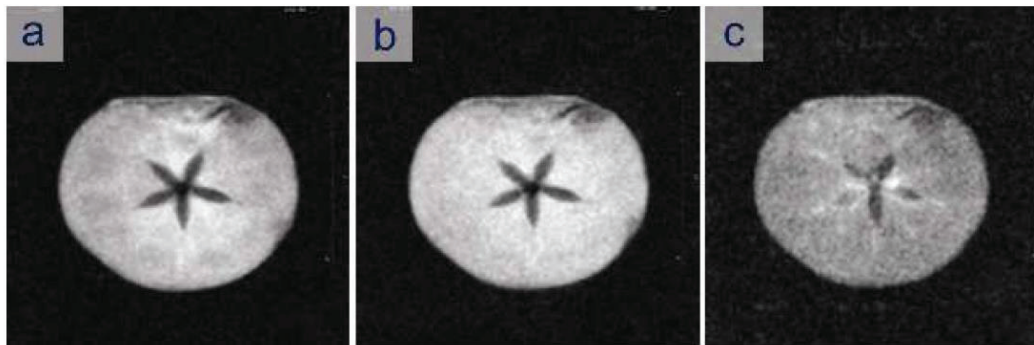
wiele produktów narażonych jest na powstawanie niekorzystnych zmian prowadzących do obniżenia ich wartości. Wpływa to istotnie na ocenę danego produktu, a niekiedy może decydować o jego wyborze przez konsumenta. W analizie struktur wewnętrznych i ocenie jakości żywności i innych materiałów biologicznych, metoda MRI ma przewagę nad innymi technikami obrazowania. Dzieje się tak dlatego, iż głównym składnikiem materiałów biologicznych jest woda, a sygnał MRI zależy od właściwości fizycznych wody i jej chemicznego otoczenia. MRI pozwala na wykonanie szerokiego zakresu pomiarów, które nie tylko pomagają w ocenie parametrów jakościowych np. w owocach i warzywach, ale również są szansą na zrozumienie podstawowych procesów fizjologicznych np. podczas przechowywania.

Zagadnienia wykorzystania metody MRI do analizy jakości wybranych owoców omówię na przykładzie jabłek [H1] i gruszek [H2]. Pierwsze doniesienie o możliwości wizualizacji szklistości miąższu jabłek metodą MRI, ukazało się już w 1988 roku [14], a rok później wykorzystano tą metodę do detekcji rozpadu chłodniczego w gruszkach [15]. W następnych latach nastąpił bardzo dynamiczny rozwój obrazowania MR w zastosowaniu do diagnostyki medycznej, co umożliwiło wykorzystanie tej metody również w przemyśle rolniczym [16, 17]. Pomiar obrazów zależnych od czasów relaksacji  $T_1$ ,  $T_2$ , pozwala na detekcję zarówno brązowień wewnątrz jabłek [18], lepsze kontrastowanie szklistości miąższu [19], jak i ocenę jego mączystości [20]. Wymienione powyżej eksperymenty przeprowadzane były z wykorzystaniem wysokopolowych systemów MR wyposażonych w magnes nadprzewodzący. Praca [H1] powstała w 2007 roku jako pierwsza z serii, gdzie po raz pierwszy w Polsce zastosowaliśmy metodę niskopolowego MRI jako rokującą, a zarazem mającą potencjał aplikacyjny, do monitorowania i oceny jakości produktów rolno-spożywczych. W badaniach wykorzystaliśmy jabłka bezpośrednio po zbiorze, w których indukowaliśmy uszkodzenia mechaniczne i obserwowaliśmy rozwój brązowienia miąższu z wykorzystaniem niskopolowej aparatury MRI (0.088 T). W pierwszej kolejności badaliśmy rozwój brązowienia miąższu jabłek w odstępach 24 h przez okres jednego tygodnia, a następnie zidentyfikowany chorobowo owoc poddaliśmy szczegółowej analizie MRI z wykorzystaniem różnych technik akwizycji danych. Na rys. 1 pokazane zostały obrazy w przekroju poprzecznym tej samej warstwy chorego jabłka uzyskane metodą MRI (rys. 1a,b) oraz obraz fotograficzny (rys. 1c). Analizując fotografię uszkodzonego jabłka, w lewym górnym rogu widać wyraźnie zmiany powstałe w wyniku upuszczenia owocu z wysokości na gładką powierzchnię. Brązowienie miąższu przejawia się na fotografii w postaci ciemniejszych obszarów. Ponadto fotografia ujawnia z prawej strony, postępujący, duży proces gnilny, zapoczątkowany wokół korytarza wydrążonego przez, wygryzającą się na zewnątrz, larwę szkodnika. Zmiany te ponownie przyjmują ciemniejszy kolor w fotografii cyfrowej. Jak widać na rys. 1a i b, opisane wyżej procesy chorobowe można dostrzec także na obrazach MR. Obrazy te zostały wykonane z zastosowaniem różnych sekwencji pomiarowych, pierwszy (rys. 1a) wykorzystuje obrazowanie ważone gęstością protonową, drugi (rys. 1b) obrazowanie ważone czasem relaksacji  $T_2$ . Wyniki pokazują, że sekwencja zależna od  $T_2$  jest bardziej adekwatna do zastosowanego problemu, co świadczy o tym, że nie tylko istotna jest zmieniająca się zawartość wody w zmienionej chorobowo tkance (mniejsza w tkankach, w których występują uszkodzenia tkanki, czy

w wydrążonych przez larwy korytarzach), ale również, zmiana otoczenia chemicznego wody (podczas procesu gnilnego).



**Rysunek 1.** (a, b) Obrazy MR oraz (c) zdjęcie fotograficzne przekroju poprzecznego chorego jabłka. Sekwencja obrazująca echa spinowego zależna (a) od gęstości protonowej oraz (b) od czasu relaksacji  $T_2$ . Na podstawie pracy [H1].



**Rysunek 2.** Obrazy w przekroju poprzecznym jabłka wykonane z wykorzystaniem różnych sekwencji pomiarowych: (a) SE, (b) FSE i (c) FLASH. Na podstawie pracy [H1].

Ważnym aspektem obrazowania MRI jest czas akwizycji danych. Ponieważ sygnał jest w przybliżeniu proporcjonalny do kwadratu indukcji pola, dla urządzeń wysokopolowych czas akwizycji może być znacznie skrócony, podczas gdy obrazowanie w niskim polu magnetycznym (u nas 0.088 T) wymaga znacznie dłuższych akumulacji danych. Dla przedstawionych na rys. 1a,b obrazów czas został wydłużony do około 100 min, względem niecałych 4 min referowanych w [18], gdzie wykorzystano system 4.7 T. Można wywnioskować stąd, że zastosowanie urządzenia niskopolowego np. do kontroli jakości będzie możliwe, jeśli tak dobierzemy sekwencje pomiarowe, aby uzyskać znaczną redukcję czasu pomiaru. Na rys. 2 prezentuję obrazy MR ukazujące ten sam fragment uszkodzonego jabłka, wykonane przy użyciu trzech różnych sekwencji pomiarowych: SE (ang. *Spin Echo*) (rys. 2a), FSE (ang. *Fast Spin Echo*) (rys. 2b) oraz FLASH (ang. *Fast Low Angle Shot*) (rys. 2c), o różnych czasach akwizycji, odpowiednio: 100 min, 25 min i 1,5 min. Na obrazie MR uzyskanym szybką sekwencją FLASH (rys. 2c) w wyniku znacznego przyspieszenia czasu akwizycji nastąpiło pogorszenie stosunku sygnału do szumu, ale wynik wciąż uwydatnia zmienione chorobowo cechy tkanki owocu jabłka, niosąc tym samym, porównywalną

informację do obrazów otrzymanych przy długim czasie akumulacji (rys. 2a). Najważniejszym wynikiem pracy [H1] było pokazanie, że niskopolowa metoda MRI może znaleźć zastosowanie w przemyśle rolniczym w celu przeprowadzenia systematycznych badań związanych z oceną jakości owoców. Moje wyniki pokazują, że badania takie będą jednak wymagały wypracowania konkretnych protokołów postępowania dla konkretnej choroby.

Kontynuacją opisanych w [H1] badań była więc praca [H2], w której opracowałem tego typu protokół do określenia wewnętrznej jakości owoców gruszki przechowywanych w warunkach kontrolowanej atmosfery (KA). Ogólnie, produkcja gruszki w Polsce sięga 65 tys. ton rocznie. Chociaż gruszka jest owocem cenionym ze względu na smak i aromat, to jest również bardzo podatna na utratę jakości i zmiany chorobowe, które zdecydowanie skracają czas jej dystrybucji i zwiększają straty pozbiornicze. Gruszki należą do owoców klimakterycznych, co oznacza, że podczas dojrzewania następuje zwiększona produkcja etylenu, a zarazem przyspieszenie procesów oddechowych. Postępujący proces dojrzewania prowadzi do zmian w barwie podstawowej skórki, rozkładu skrobi, czy też mięknięcia miąższu. W związku z tym owoce pozostają twarde przez ograniczony czas po zbiorach, a ponadto są wrażliwe na uszkodzenia mechaniczne i zmiany chorobowe. Opracowano różnorodne technologie przechowywania owoców po zbiorze w celu utrzymania wyglądu gruszki, zmniejszenia tempa oddychania i transpiracji oraz ograniczenia zaburzeń starzenia. Jednym z takich sposobów jest wspomniane już przechowywanie w warunkach kontrolowanej atmosfery.

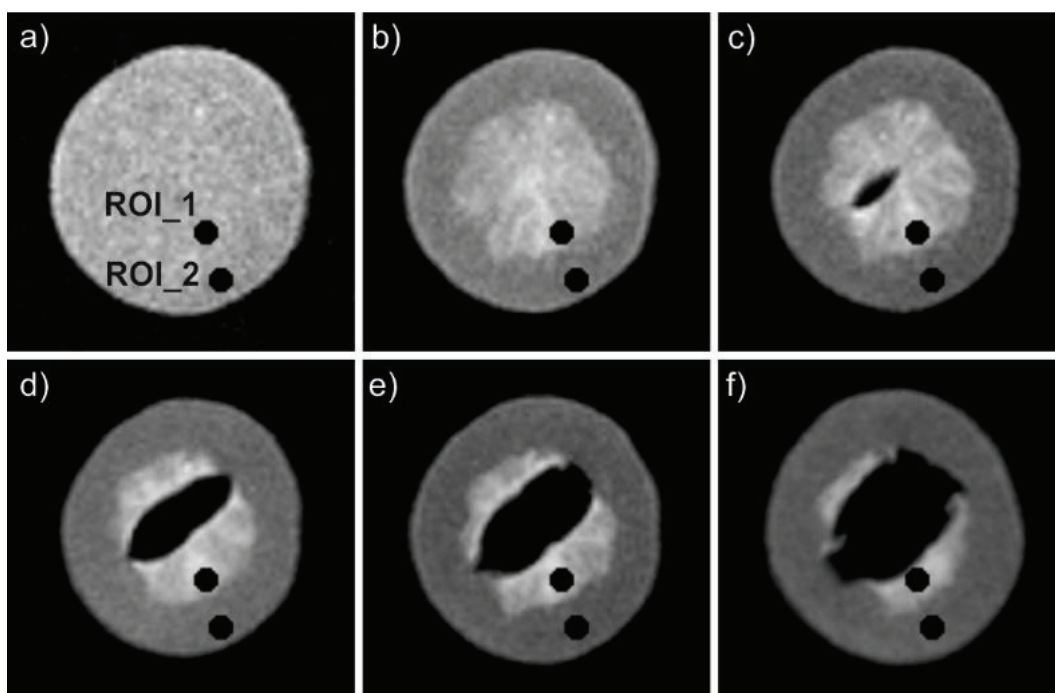
Podczas przechowywania w warunkach KA aktywność metaboliczna owoców gruszki jest zmniejszana poprzez kontrolowanie ciśnień parcjalnych  $O_2$  i  $CO_2$ , zwykle w połączeniu ze zmniejszeniem temperatury w komorze. Optymalne warunki przechowalnicze są zawsze kompromisem, to znaczy, temperatura musi zostać obniżona, aby zminimalizować aktywność metaboliczną, unikając jednocześnie schłodzenia wywołującego uszkodzenia tkanki owocowej; ciśnienie parcjalne  $O_2$  musi zostać obniżone, aby zminimalizować oddychanie tlenowe, unikając jednocześnie fermentacji; a podwyższone ciśnienie parcjalne  $CO_2$  pomaga w zachowaniu koloru skórki, ale może powodować uszkodzenia owoców. Zastosowanie nieodpowiednich warunków atmosfery przechowywania może spowodować poważne zmiany tkanki owocowej bez widocznych objawów zewnętrznych. Dlatego istnieje duże zapotrzebowanie na nieinwazyjną metodę, która wykryłaby wewnętrzne przechowalnicze zmiany chorobowe (takie jak brązowienie miąższu, czy powstawanie kawern) i ich rozwój w czasie, zachowując jednocześnie owoce w nienaruszonym stanie.

Pierwsze doniesienia odnośnie zastosowania metody MRI w badaniach gruszek pojawiły się we wspomnianej już pracy [15] w 1989 roku, gdzie potwierdzono, że technika MRI jest odpowiednim narzędziem do nieniszczącego wykrywania rozpadu chłodniczego miąższu gruszek (na przykładzie odmiany „Bartlett”). Od tamtego czasu powstało zaledwie kilka dalszych badań dotyczących bezpośrednio tematyki przechowywania gruszek i zasadniczo były one przeprowadzane z wykorzystaniem systemów wysokopolowych. Badano przestrzenne rozmieszczenie symptomów rozpadu chłodniczego w gruszkach odmiany „Konferencja” [21], rozwój rozpadu miąższu i powstawanie kawern podczas przechowywania [22]. Wykorzystano wysokopolową metodę MRI do potwierdzenia modelu makroskopowego transportu wody w gruszkach podczas przechowywania, przyjmując podejście elementów



skończonych oparte na drugim prawie dyfuzji Ficka [23]. Opracowano również nieniszczącą procedurę identyfikacji on-line zaburzeń brązowienia gruszek metodą MRI [24]. W roku 2013 zastosowano po raz pierwszy niskopolowy system 0.2 T MRI do badań związanych z obrazowaniem owocu gruszki [25]. Głównym celem tych badań była obserwacja zmian zachodzących w owocach podczas wzrostu za pomocą mobilnego urządzenia MRI. Badania zmian przechowalniczych z wykorzystaniem systemów niskopolowych nie były podejmowane i w tym kontekście podjęta w pracy [H2] tematyka jest nie tylko interesująca z punktu widzenia poznawczego, ale również aplikacyjnego.

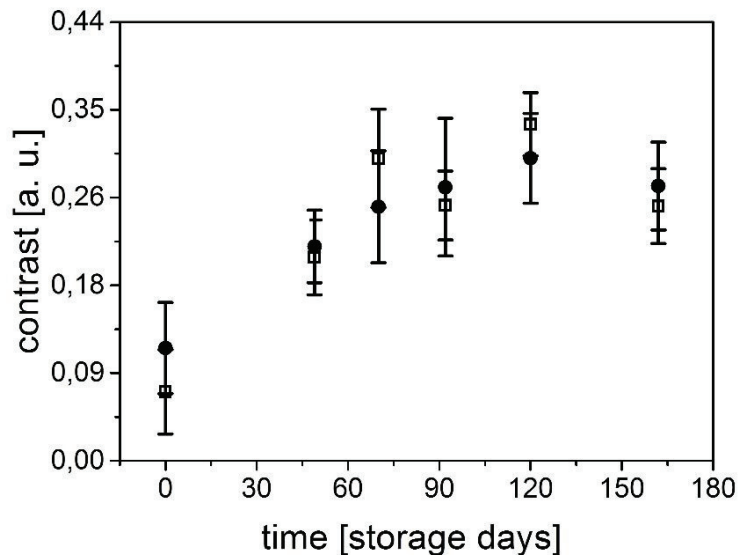
W doświadczeniu opisanym w pracy [H2] wykorzystałem gruszki odmiany „Konferencja”. Owoce były przechowywane przez sześć miesięcy w komorze o stabilizowanej temperaturze (1 °C) z zastosowaniem modyfikowanej atmosfery sprzyjającej rozpadowi chłodniczemu:  $\text{CO}_2 > 1 \%$ ,  $\text{O}_2 < 1 \%$ . W okresie przechowywania wykonano badania MRI korzystając ze skanera 0.2 T znajdującego się w Instytucie Fizyki Akademii Górniczo Hutniczej w Krakowie. Pierwsze badanie wykonano 11 dni po umieszczeniu owoców w warunkach kontrolowanej atmosfery, a kolejne w odstępach miesięcznych. Na rys. 3 widzimy wybrane obrazy MR w przekroju poprzecznym wykonane dla tego samego, owocu gruszki podczas całego cyklu przeprowadzonych w pracy [H2] badań.



**Rysunek 3.** Obrazy MR ważone czasem  $T_1$  wybranego owocu gruszki wykonane podczas całego okresu przechowalniczego. (a) 11 dni i (b-f) w odstępach około miesięcznych, po umieszczeniu w warunkach KA. ROI\_1, ROI\_2 to obszary zainteresowania użyte do ilościowej analizy wybranej zmiany chorobowej. Na podstawie pracy [H2].

Rozpad mięszu to jedno z najczęściej występujących zaburzeń fizjologicznych występujących w gruszkach. Rozpoczyna się od zniszczenia błon komórkowych, co prowadzi do rozpadu tkanki, utraty wilgoci, a ostatecznie do powstania pustych przestrzeni (kawern). Zmniejszenie zawartości wolnej wody w dotkniętej chorobą tkance manifestuje się na obrazach

$T_1$ -ważonych większą intensywnością sygnału. Na rys. 3b-f wyraźnie widać powstającą niejednorodność tkanki gruszki. Ciemno-szary obszar na zewnątrz, i jasny obszar w środku warstwy, odpowiadają odpowiednio zdrowej i chorej tkance. Czarny obszar powstający wokół rdzenia (Rys. 3c-f) ujawnia rozwój kawerny. Wyniki pokazują, że obszar dotknięty rozpadem mięszu powstał w trakcie pierwszego miesiąca przechowywania (rys. 3b), a po kolejnym miesiącu jasny kontrast (zależny od czasu relaksacji  $T_1$ ) osiągnął maksymalną intensywność, świadcząca o braku wody swobodnej (rys. 3c). W kolejnych miesiącach, z obszaru zbrązowiałego wciąż migrowała woda doprowadzając stopniowo do coraz większego zapadania się tkanki, w wyniku czego powstawała kawerna (rys. 3c-f). Ponadto, obszar objęty zmianą chorobową, po powstaniu nie powiększa się, co potwierdza, że tego typu choroby chłodnicze mają swoje źródła już na etapie wzrostu. Uzyskane w toku pracy [H2] wyniki pokazały również, iż nie wszystkie owoce rozwinęły centralne brązowienie.



**Rysunek 4.** Kontrast między dwoma badanymi obszarami ROI (tkanką zdrową i zmienioną chorobowo) w zależności od czasu przechowywania w warunkach KA. Punkty o różnych kształtach odpowiadają dwóm różnym owocom. Na podstawie pracy [H2].

W dalszej części pracy [H2] dokonuję ilościowej oceny wewnętrznych uszkodzeń tkanki owocu gruszki. W tym celu przeprowadziłem analizę obrazów MRI. Wykorzystuję do tego celu wyniki MRI uzyskane dla owoców wykazujących najcięższe uszkodzenia tkanki, przekraczające 25% całkowitej objętości. Dla tych obrazów przeprowadzam zabieg segmentacji, który polega na identyfikowaniu obszarów obrazu, których wygląd jest jednolity. Przeprowadzona analiza obrazu pozwoliła na określenie dynamiki stopnia wewnętrznego rozpadu mięszu oraz dynamikę powstawania kawern. Wybrane wyniki uzyskane w trakcie badań [H2] przedstawiłem na rys. 4. Wykres przedstawia zmiany kontrastu pomiędzy dwoma badanymi obszarami ROI\_1 i ROI\_2 (rys. 3a) w trakcie całego okresu przechowywania. Możemy zobaczyć, że kontrast rośnie w przybliżeniu liniowo podczas pierwszych 65 dni przechowywania, a następnie pozostaje na stałym poziomie. Tworzenie się kawern jest

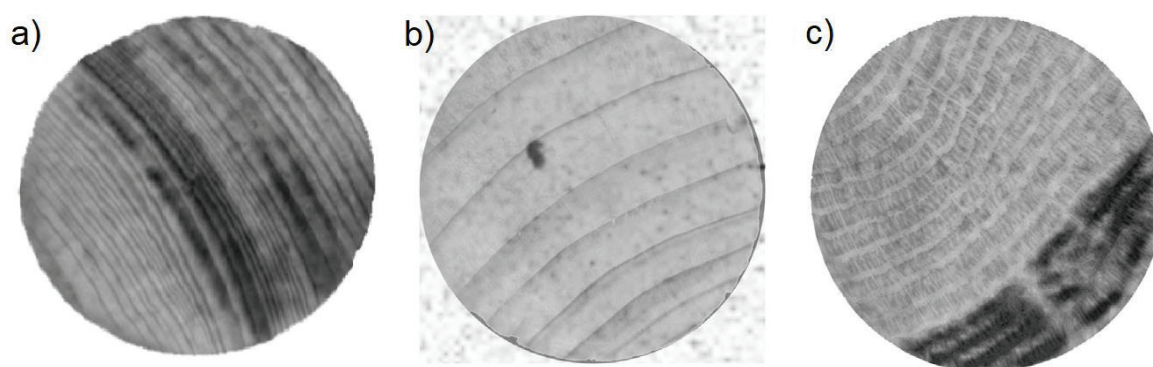
odpowiedzialne za ustabilizowanie wartości kontrastu występujące dla dłuższych czasów przechowywania.

Głównym wynikiem pracy [H2] jest pokazanie, iż niskopolowa metoda MRI może być z powodzeniem wykorzystana do zobrazowania wewnętrznej niejednorodności tkanek owoców gruszki i do śledzenia fizjologicznych zmian zachodzących podczas ich przechowywania w warunkach KA. Wyniki MRI pokazują dynamiczne zmiany ilości wody w uszkodzonej tkance owocu. Podobne, niskopolowe urządzenia MRI mogą być zatem rozsądną alternatywą dla przemysłu rolniczego, ponieważ niższa rozdzielczość obrazów jest i tak wystarczająca do oceny zachodzących zmian wewnętrznych poszczególnych owoców, a zarazem do optymalizacji warunków przechowalniczych. Ważnym rezultatem jest również opracowanie metod analizy ilościowej obrazów MR, co podobnie jak w diagnostyce klinicznej jest kluczowe w rzetelnej i powtarzalnej ocenie postępującej zmiany chorobowej.

#### **4.3.3 Badanie transportu wody w drewnie metodą niskopolowego MRI**

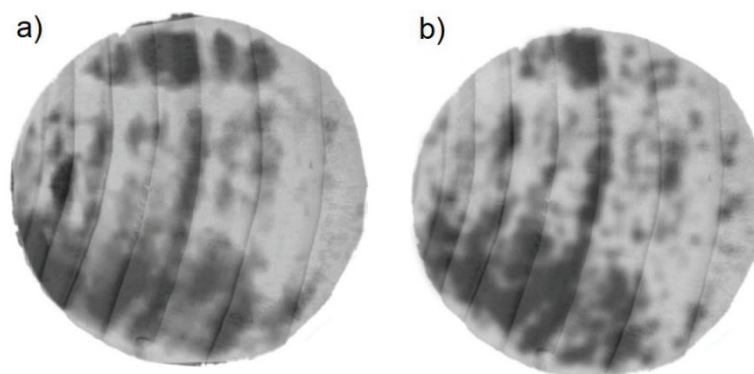
Omawiana w pracach [H1] i [H2] tematyka kontroli jakości owoców wpisuje się w obszar badań stosowanych. W kolejnej pracy [H3] pokazuję, że niskopolowe MRI również dobrze nadaje się do celów badawczych w zakresie nauk podstawowych, na przykład do zagadnień związanych z transportem wody w systemach roślinnych. Transport wody obserwuje się zarówno w częściach podziemnych [26, 27] jak i naziemnych roślin [28]. Obrazowanie mikrostruktur tkanki przewodzącej odpowiedzialnej za transport wody wymaga najwyższej zdolności rozdzielczej uzyskiwanej w wysokopolowych urządzeniach MRI [29]. Jednakże, jak pokazuję w pracy [H3], także w tej tematyce jest miejsce na niskopolowe obrazowanie. Jest to możliwe w przypadku większych struktur i z zastosowaniem specjalnych technik wzmacniających sygnał. W pracy [H3] zaproponowałem dwie metody przyspieszające akwizycję danych. W pierwszej do wody dodano niewielką ilość soli paramagnetycznej, aby skrócić czas relaksacji  $T_1$  i umożliwić szybkie uśrednienie sygnału. W drugiej, zamiast wody z paramagnetykiem, jako środek kontrastowy zastosowałem hiperspolaryzowany gaz  $^3\text{He}$  (HP  $^3\text{He}$ ), który zwiększa sygnał MRI o kilka rzędów wielkości [30]. Zastosowanie gazu HP  $^3\text{He}$  w tkankach o niskiej gęstości protonów, takich jak płuca [31] lub w materiałach porowatych [32], prowadzi do zwiększenia czułości metody i kontrastu. Jako materiał badawczy w pracy [H3] wybrałem drewno, zarówno drzew iglastych jak i liściastych. Zagadnienie transportu wody w drewnie jest ważne w wielu gałęziach przemysłu, na przykład dla zastosowań drewna jako materiału budowlanego. Powszechnie wiadomo, że obecność wody silnie wpływa na stabilność konstrukcji drewnianych, ze względu na ich podatność na atak grzybów w obecności wilgoci [33]. Proces zależy od głębokości wnikania wody lub innych roztworów wodnych do wnętrza materiału. Dlatego te informacje są ważne na każdym etapie prac związanych z konstrukcją drewnianą. Problem transportu wody w drewnie jest bardzo złożony, ponieważ jest to materiał biologiczny, porowaty, o niejednorodnym układzie porów. Niemal każdy gatunek drewna charakteryzuje się innymi właściwościami strukturalnymi [34], które wpływają na jego właściwości nasiąkania i suszenia, czyli przewodzenia wody. Do elementów strukturalnych zalicza się wczesne i późne drewno słoju rocznych przyrastających rok po roku wewnątrz pnia. Komórki wczesnego drewna, są cienkościenne o dużej średnicy, natomiast komórki późnego drewna są grubościenne, o małej

średnicy. Ponadto, w przekroju poprzecznym pnia rozróżniamy drewno środkowej części tzw. twardziel i drewno obrzeża tzw. biel. Przewodzenie wody z korzeni do liści jest jedną z najważniejszych funkcji bielu, natomiast nie występuje w twardzieli. Transport wody w żywych drzewach iglastych i liściastych przebiega w inny sposób, co skutkuje zmienną przewodnością hydrauliczną. Wynika to z różnic w budowie tkanki przewodzącej. Cewki są głównymi składnikami drewna iglastego i odpowiadają jednocześnie za właściwości mechaniczne i transport wody w żywym drzewie. Z drugiej strony struktura drewna liściastego jest bardziej skomplikowana, ponieważ włókna decydujące o wytrzymałości mechanicznej, nie przewodzą wody. W żywym drzewie liściastym woda jest transportowana przez wyspecjalizowane naczynia, które są zwykle znacznie dłuższe i szersze niż inne włókna. Do tej pory badano transport wody w drewnie z wykorzystaniem wysokopolowych urządzeń MRI [35, 36, 37]. Zademonstrowano, że jest to bardzo dobra technika nie tylko do obrazowania struktur drewna [38], ale również do uwidocznienia niejednorodnego rozmieszczenia wody w drewnie świerka białego i sosny [39, 40], struktury słoju rocznych drewna cedrowego [41, 42], do pokazania ścieżek przepływu wody w późnym drewnie jodły Douglas [43], czy też do diagnozowania zmian w drewnie modyfikowanym termicznie [44]. Dzięki zastosowaniu kontrastu w wysokopolowym obrazowaniu MR precyzyjnie określono przepływ w ksylemie sosny [45], a także obrazowano sęki w drewnie świerkowym [46]. Przebadano również ścieżki przepływu w drewnie przy użyciu hiperpolaryzowanego gazu  $^{129}\text{Xe}$  [47, 48]. W pracy [H3] za cel postawiłem sobie opracowanie nowatorskiego protokołu umożliwiającego uwidocznienie ścieżek przepływu w drewnie z wykorzystaniem niskopolowego urządzenia MRI (0.088 T). Biorąc pod uwagę złożoność problemu, wynikającą ze struktury drewna, do badań wybrałem trzy radykalnie różne gatunki drewna: świerkowe – żywiczne drewno iglaste, jodłowe – nieżywiczne drewno iglaste i dębowe – twarde drewno liściaste. W celu wymuszenia i przyspieszenia przepływu wody w próbkach drewna, zastosowałem próżniową pompę membranową. Dla danej próbki drewna uzyskiwano przepływ stacjonarny.



**Rysunek 5.** Obrazy MR przepływu wody z kontrastem w drewnie: (a) jodły, (b) świerka, (c) dębu. Zaciemnienia na obrazach wskazują obecność wody. Na podstawie pracy [H3].





**Rysunek 6.** Porównanie obrazów MR ścieżek przepływu w tej samej próbce drewna. Jako środek kontrastowy użyto (a) HP  $^3\text{He}$  i b) wody z dodatkiem jonów paramagnetycznych. Na podstawie pracy [H3].

Wyniki MRI z kontrastem paramagnetycznym uzyskane w toku prowadzonych w [H3] badań pokazują zdecydowane różnice międzygatunkowe w stopniu penetracji próbek wodą. Na rysunku 5 przedstawiam wybrane rezultaty z pracy [H3], dotyczące porównania obrazów MR w przekroju poprzecznym dla omawianych trzech różnych rodzajów drewna. Wyniki pokazały, że w przypadku wszystkich trzech gatunków drewna obrazy MR uwidaczniają penetrację wody wzdłuż struktur równoległych do kierunku wzrostu drzew. Dla drewna jodły zaobserwowałem ścieżki przepływu w drewnie późnym (rys. 5a). W drewnie świerkowym przepływ był zdecydowanie najbardziej ograniczony i uwidaczniał się w badanej próbce jedynie dla dużych kanałów (prawdopodobnie spowodowane pęknięciami w drewnie), nie obserwowałem natomiast przepływu w drewnie późnym (rys. 5b). Zwiększony opór przepływu może wynikać z budowy, ale również z obecności żywicy. W drewnie dębowym obserwowałem najbardziej intensywny przepływ wody, ale ograniczony jedynie do obszaru bielu (rys.5c).

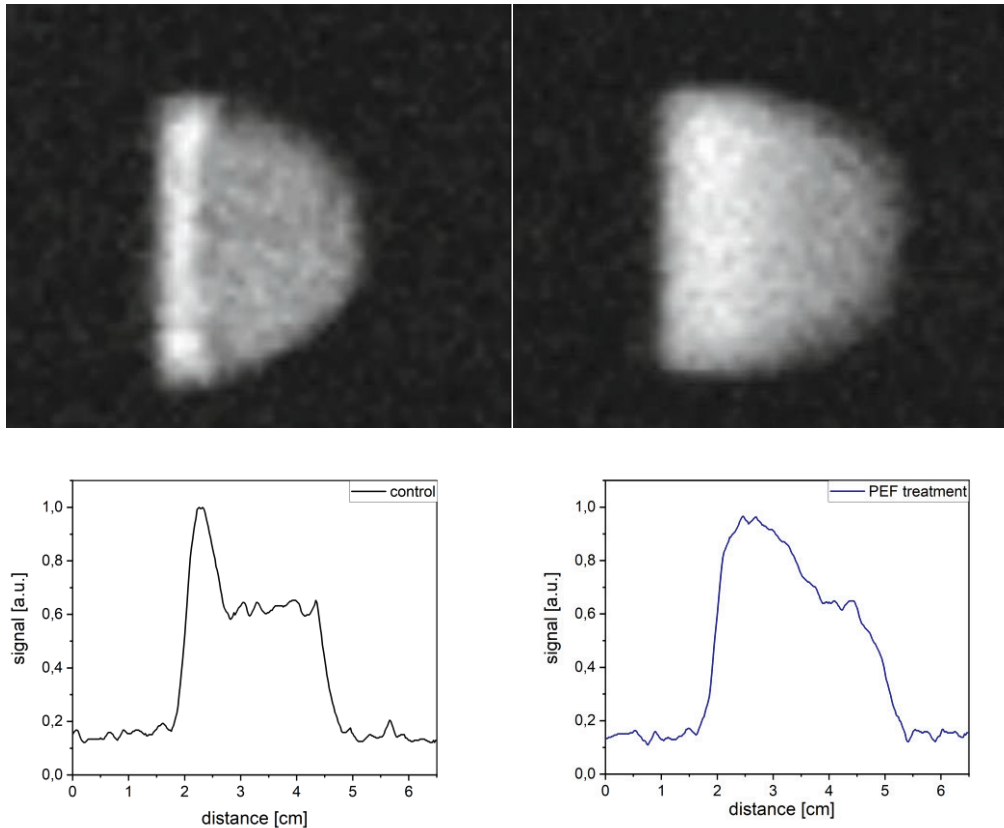
Ograniczeniem dla protonowego MRI jest czas eksperymentu i jest on zwykle tak długi, że wyklucza możliwość dynamicznego obrazowania. Można go w pewnym stopniu skrócić stosując paramagnetyczny środek kontrastowy, który skraca czas relaksacji podłużnej wody  $T_1$ , co udało się zrobić w pierwszej części badań [H3]. Mimo to całkowity czas akwizycji wynosił wciąż około 10 min. Jako alternatywne rozwiązanie zaproponowałem obrazowanie MR z wykorzystaniem HP  $^3\text{He}$ . W tym przypadku intensywność sygnału jest niezależna od indukcji pola magnetycznego. Wyniki przedstawione na rys 6a pokazują możliwość wizualizacji kanałów w drewnie za pomocą HP  $^3\text{He}$ . Użycie gazu zamiast wody wymagało odpompowania danej próbki drewna do około 10 mbar, a następnie wprowadzenia spolaryzowanego gazu. Dzięki szybkim sekwencjom pomiarowym udało się skrócić całkowity czas akwizycji do 2 s. Na rys. 6 pokazuję porównanie wyników obrazowania MR z zastosowaniem dwóch różnych środków kontrastujących, gdzie widać wyraźnie, że oba obrazy pokazują podobny rozkład słoików rocznych.

Najistotniejszym rezultatem pracy [H3] było pokazanie, że niskopolowa metoda MRI może być z powodzeniem zastosowana do badania kanałów przepływu wody w heterogenicznej strukturze drewna. Znakomicie ukazywała przepływ wody z szybkościami przekraczającymi dyfuzję w typowym materiale porowatym, uwidaczniając w ten sposób złożoną strukturę drewna.

#### 4.3.4 Zastosowanie niskopolowego obrazowania MR do oceny wpływu impulsowego pola elektrycznego na elektroporację błony komórkowej.

Kolejnym celem podjętym w pracy [H4], było zaproponowanie metodologii, która umożliwiłaby wykorzystanie metody niskopolowego MRI do badania elektroporacji błony komórkowej bulwy ziemniaczanej poddanej impulsowemu polu elektrycznemu (PEF, *ang. pulsed electric field*). Elektroporacja jest zjawiskiem fizycznym, w którym materiały biologiczne poddaje się działaniu pola elektrycznego, co prowadzi do lokalnych zmian grubości błony komórkowej, a w konsekwencji do przzerwania jej ciągłości. W wyniku uszkodzenia błony komórkowej zwiększa się jej przepuszczalność, umożliwiając swobodny przepływ różnych składników, takich jak jony, cząsteczki, czy związki. Przy dostatecznie dużym natężeniu pola elektrycznego, elektroporacja błony jest nieodwracalna, więc jej podstawowe funkcje życiowe nie mogą zostać przywrócone, co prowadzi do trwałej utraty homeostazy [49]. Technika PEF jest szeroko stosowana w ostatnich dziesięcioleciach w przetwarzaniu żywności [50, 51], poczynając od konserwacji żywności, ze względu na zdolność do dezaktywacji patogennych mikroorganizmów [52, 53], poprzez zastosowanie do poprawy wydajności niektórych procesów przetwarzania żywności [54, 55], a kończąc na wykorzystaniu PEF do poprawy aktywności i stabilności związków bioaktywnych i składników odżywczych [56, 57]. Ogólnie stopień uszkodzenia błony komórkowej w materiale biologicznym można obserwować różnymi metodami [58] takimi jak pomiar impedancji elektrycznej lub przewodnictwa elektrycznego [59, 60], za pomocą enzymatycznego brązowienia [61, 62] lub wykorzystując bardziej zaawansowane metody polegające na barwieniu komórek wykazujących aktywność metaboliczną [63, 64]. Jeśli chodzi o wykorzystanie metody MRI, do obserwacji zmian zachodzących w błonach komórkowych w wyniku działania PEF, to podobnie jak w przypadku [H1, H2, H3], do tego celu wykorzystano dotychczas głównie duże i drogie urządzenia MRI o wysokiej wartości indukcji pola magnetycznego [61, 65, 66].

W pracy [H4] nie tylko pokazuję, że niskopolowa metoda MRI może zostać użyta do badań ilościowych i jakościowych utraty ciągłości błon komórkowych, ale również oceniam stopień elektroporacji za pomocą pomiarów przewodnictwa elektrycznego, a także testów sprężystości, w celach porównawczych i weryfikacyjnych. Wybrany materiałem do badań w ramach pracy [H4] była bulwa ziemniaka wczesnej odmiany „Lord”. Strategia eksperymentu polegała na takim wyborze parametrów PEF, które w różnym stopniu uszkadzają błonę komórkową bulwy ziemniaka. Po każdym etapie PEF produkt umieszczano w roztworze zawierającym paramagnetyczny środek kontrastowy i wykonywano niskopolowe obrazowanie MR. Badałem w jakim stopniu i z jaką dynamiką zachodzi transport jonów z roztworu do wnętrza rośliny pod wpływem występującego naturalnie ciśnienia osmotycznego. Wybrane wyniki uzyskane w toku badań prowadzonych w [H4] pokazane zostały na rys.7. Wzmocnienie sygnału, a co za tym idzie penetracja kontrastu, jest różna w bulwach ziemniaka poddanych działaniu PEF i tych kontrolnych i wraz ze wzrostem ilości impulsów PEF rośnie. Wynik ten potwierdza nieodwracalne uszkodzenie błon komórkowych wywołane obróbką PEF, prowadzące do nieselektywnego przepływu jonów.



**Rysunek 7.** Obrazy MR (górny wiersz) i jednowymiarowe profile (dolny wiersz) ukazujące głębokość wnikania środka kontrastującego wewnątrz bulwy ziemniaka po czasie 98 h ekspozycji na roztwór z środkiem kontrastowym: kontrola (lewa strona), 5 impulsów PEF (prawa strona). Na podstawie danych z pracy [H4].

Pokazuję tym samym, że obrazowanie MR niesie informację o przestrzennym rozmieszczeniu uszkodzeń w próbce i ich ewolucji w czasie. Stosunkowo wysoka rozdzielczość, wynosząca  $1 \times 1$  mm w płaszczyźnie obrazowania, pozwala badać lokalnie występujące efekty. Jednak niskopolowe MRI uwidacznia tylko główne cechy strukturalne bulw ziemniaka, nie widzimy natomiast cech mikrostrukturalnych, takich jak na przykład rozmieszczenie rdzenia, czy wiązek naczyniowych w miększu spichrzowym. Takie szczegóły morfologiczne są jednak nieistotne w badaniach migracji związku kontrastowego przez przestrzenie wewnątrzkomórkowe i międzykomórkowe, w wyniku rozpadu błon komórkowych. W dalszej części w pracy [H4] dokonuję ilościowej analizy głębokości wnikania związku kontrastowego do tkanki ziemniaka. Obliczenia przeprowadzam na podstawie średnich profili intensywności sygnału pozyskanego z obrazów MR (rys. 7), przy różnych czasach ekspozycji na związek kontrastowy i dla różnych parametrów PEF. Zgodnie z oczekiwaniem, uzyskane wyniki pokazują, że głębokość wnikania jest niewielka, i praktycznie stała w czasie dla próbki kontrolnej, podczas gdy w próbkach poddanych obróbce PEF, rośnie liniowo w czasie. Ponieważ trendy dla próbek objętych działaniem PEF są zbliżone, niezależnie od parametrów PEF, może to wskazywać na to, że proces wnikania jest silnie nieliniowy w początkowym etapie ekspozycji na roztwór zawierający środek kontrastowy. Zastosowana podczas analizy metoda regresji liniowej pokazuje jedynie trendy danych i nie odnosi się do żadnego modelu. W ostatniej części pracy [H4] przedstawiam wyniki pomiarów

przewodnictwa elektrycznego oraz testy sprężystości. Pokazuję, że przewodność elektryczna wzrasta wraz z czasem przebywania próbki w roztworze dla wszystkich bulw poddanych obróbce PEF, przy czym efekt jest tym większy, im większa jest ilość impulsów pola elektrycznego. Z kolei wyniki elastyczności pokazały, że kontrolne bulwy ziemniaka są najbardziej elastyczne, a stopień elastyczności bulwy ziemniaka po obróbce PEF maleje wraz z ilością impulsów, ale różnice nie są istotne statystycznie.

Głównym wynikiem pracy [H4] było pokazanie, że niskopolowa metoda MRI może służyć do analizy ilościowej i jakościowej w złożonych procesach transportu jonów. Po zaabsorbowaniu dawki PEF w bulwie obserwowano migrację jonów, które jednocześnie były znacznikami w obrazowaniu MR. Pomiary przewodnictwa metodą konduktometryczną są bardzo czułe, ale już po paru godzinach, niemożliwe do dalszego kontynuowania. Było to wynikiem degradacji próbki. Natomiast roztwór z związkami paramagnetycznymi, który został użyty w eksperymentach MRI, działał aseptycznie, zapobiegając rozpadowi tkanki. W tym przypadku czas penetracji środka kontrastowego był ograniczony jedynie przez wielkość próbki, co pozwala na długoterminową obserwację transportu jonów.

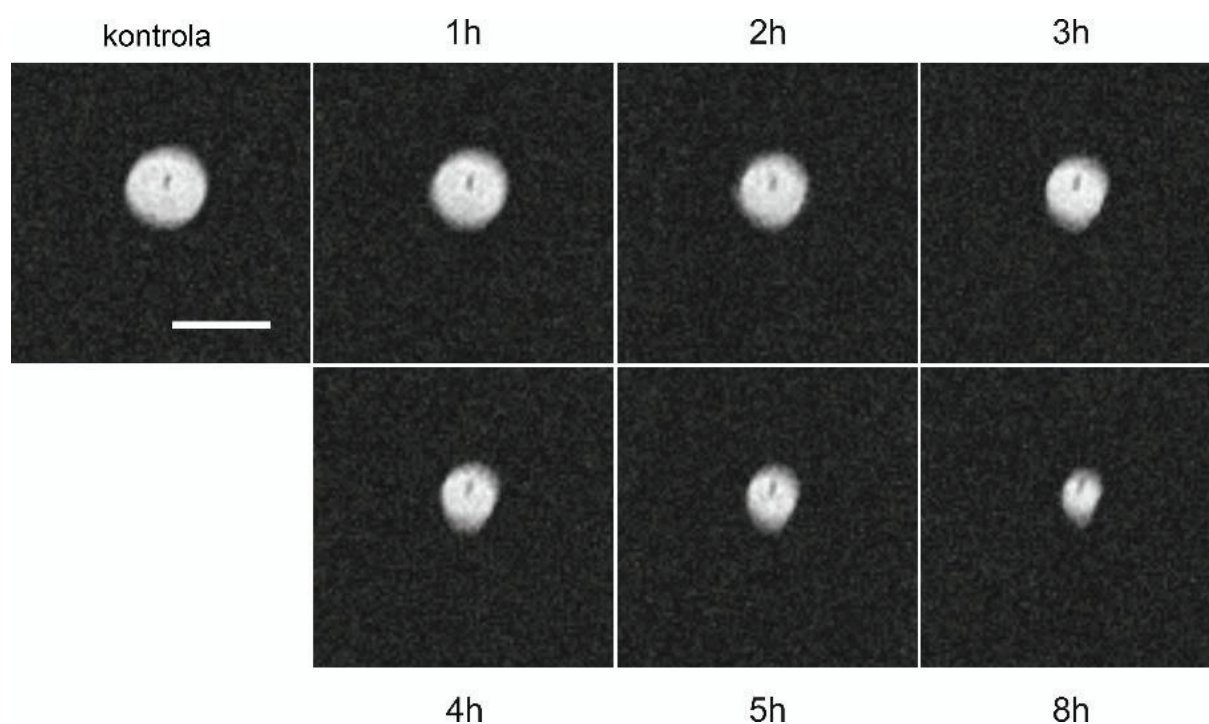
#### **4.3.5 Badanie procesu odwodnienia osmotycznego w tkankach roślinnych metodą niskopolowego MRI**

Najstarszym i wciąż powszechnym sposobem podwyższenia trwałości wybranych owoców i warzyw jest proces suszenia. Suszenie konwekcyjne, gdzie wraz ze strumieniem ciepła unoszona jest woda, jest często połączone z obniżeniem ciśnienia wokół próbki, co skutkuje zwiększonym jej parowaniem, lub z obróbką wstępną, taką jak na przykład odwadnianie osmotyczne. Mechanizmy związane z odwadnianiem osmotycznym owoców i warzyw są wciąż szeroko badane, o czym świadczą prace przeglądowe [67, 68, 69]. W uproszczeniu osmoza prowadzi do transportu wody z wnętrza próbki do roztworu hipertonicznego (odwodnienie), z jednoczesnym transportem substancji osmotycznej do wnętrza próbki (impregnacja). Podczas tego procesu można również zaobserwować wypłukiwanie naturalnych składników z próbki. Siłą napędową zjawiska transportu wody przez błony półprzepuszczalne jest różnica potencjałów chemicznych po obu stronach błony. Istnieje wiele prac dotyczących wysokorozdzielczego obrazowania tkanki cukinii metodą MRI [70, 71], natomiast doniesienia dotyczące zastosowania metody MRI w kontekście odwodnienia osmotycznego pojawiają się sporadycznie i dotyczą jedynie owoców [72].

Głównym celem badań opisanych w pracy [H5] była ocena możliwości obserwacji przestrzennego rozmieszczenia substancji osmotycznej w tkance cukinii i jej ewolucji w czasie z wykorzystaniem metody MRI (0.088 T). Materiałem badawczym w pracy [H5] była cukinia odmiany „Astra Polka”. Ciekawym pomysłem, który zrealizowałem w pracy [H5] było wykorzystanie nasyconego roztworu soli paramagnetycznej zarówno jako środek osmotyczny, jak i środek kontrastowy dla niskopolowej metody MRI. Doświadczenie zaplanowano tak, aby wyniki poddać prostej analizie makroskopowej, która zweryfikowałaby przydatność proponowanej metody MRI. W związku z tym wykonano dwa równoległe eksperymenty. W pierwszym analizowałem kinetykę odwadniania osmotycznego jako ubytek wody (WL, *ang. water loss*) i przyrost masy substancji (SG, *ang. solid gain*) klasyczną metodą wagową, w drugim wykorzystałem metodę MRI.



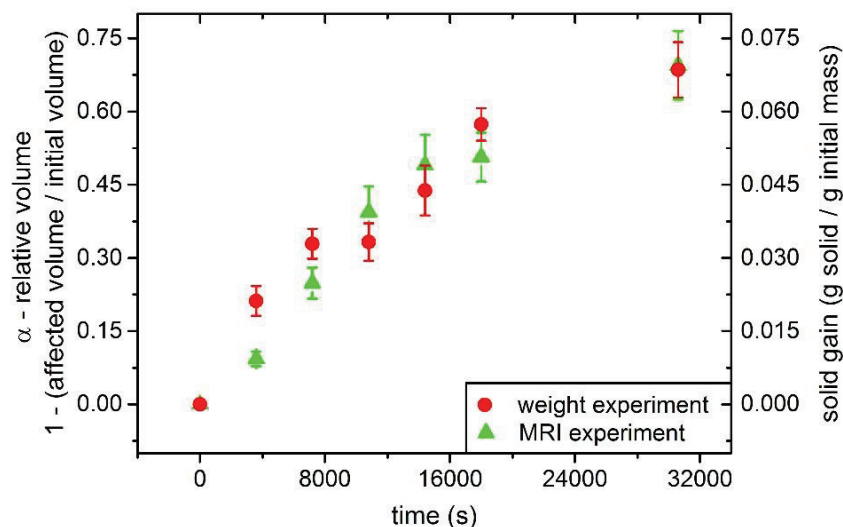
Wyniki, które uzyskałem w trakcie analizy transportu masy wskazują na quasi-wykładniczą zależność, która charakteryzuje się szybkim wzrostem parametrów SG i WL w ciągu pierwszych 2 h procesu odwodnienia osmotycznego, co było zgodne z oczekiwaniem. Fizycznie efekt ten tłumaczy się poprzez występowanie dużej siły napędowej w początkowej fazie procesu, która z czasem maleje, oraz możliwością zatykania się naczyń włosowatych na granicy faz w wyniku dużego stężenia soli w końcowej fazie procesu. Ważnym aspektem tej części prac było wyznaczenie efektywnych współczynników dyfuzji wody i substancji rozpuszczonej, podczas odwadniania osmotycznego, wykorzystując model matematyczny oparty na drugim prawie Ficka. Otrzymane wartości wynosiły odpowiednio  $2.91(47) \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  dla wody i  $1.64(17) \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  dla substancji rozpuszczonej.



**Rysunek 8.** Obrazy MR w przekroju poprzecznym cylindrycznej próbki cukinii podczas odwadniania osmotycznego w roztworze soli paramagnetycznej. Obraz (kontrola) uzyskany przed zanurzeniem tkanki w roztworze i obrazy (1-8h) uzyskane w różnych odstępach czasowych procesu osmotycznego. Ciemne punkt na środku obrazów wskazują położenie uchwytu próbki. Pasek skali przedstawia 20 mm. Na podstawie pracy [H5].

Druga część pracy [H5] poświęcona jest analizie jakościowej i ilościowej danych uzyskanych w trakcie badań MRI. Na rys. 8 przedstawiam obrazy MR w przekroju poprzecznym w różnych fazach procesu odwadniania osmotycznego. Obraz kontrolny (rys. 8kontrola) odzwierciedla zawartość wody w próbce. W efekcie postępującego odwadniania tkanki powierzchnia jasna na obrazie MR maleje, ponieważ sól wnika do tkanki sprawia, że staje się ona systematycznie niewidoczna w metodzie MRI (rys. 8 1h-8h), aż do całkowitego wygaśnięcia sygnału. Ponadto na rysunku 8 widać dodatkową informację, iż impregnacja następuje stopniowo, obejmując warstwa po warstwie, od warstw zewnętrznych, aż do samego centrum, całą próbkę. W kolejnym kroku wykonałem analizę obrazów MR

polegającą na określeniu objętości tkanki zajętej przez sól paramagnetyczną w różnych fazach odwadniania osmotycznego stosując technikę planimetryczną, analogiczną do używanej w badaniach klinicznych [73, 74]. W efekcie zastosowane podejście umożliwiło wyznaczenie parametru SG, a tym samym efektywnego współczynnika dyfuzji dla substancji rozpuszczonej otrzymując wartość  $1.91(11) \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , co zgadza się z wartością wyznaczoną wcześniej w eksperymencie wagowym. Porównanie kinetyki przyrostu parametru SG, otrzymanego dwoma różnymi metodami przedstawiłem na wykresie 9. Widzimy, iż kinetyka przyrostu masy suchej ma ten sam charakter niezależnie od sposobu obserwacji i analizy danych.



**Rysunek 9.** Kinetyka odwadniania osmotycznego tkanki cukinii uzyskana z klasycznego eksperymentu wagowego (czerwone kółka) oraz wykorzystując metodę MRI (zielone trójkąty). Na podstawie wyników z pracy [H5].

Otrzymane w pracy [H5] wyniki wskazują na szereg zalet metoda MRI w porównaniu z bezpośrednią analizą transportu masy: (i) aby określić przebieg procesu odwadniania osmotycznego, potrzeba wielu próbek; (ii) konieczne jest przeprowadzenie oddzielnego doświadczenia w celu określenia początkowej wartości suchej masy. Powoduje to potencjalny rozrzut wyników z powodu różnic między próbkami spowodowany ich niejednorodnością, co jest nieuniknione w każdym materiale biologicznym. Natomiast w metodzie MRI pojedyncza próbka jest wystarczająca do monitorowania całego procesu odwadniania osmotycznego, co zasadniczo skraca czas całego badania. Wszystkie te zalety są ważne w zastosowaniach praktycznych, zwłaszcza przy badaniu obiektów biologicznych, takich jak owoce i warzywa.

#### 4.3.6 Podsumowanie

Przedstawione powyżej cele szczegółowe wraz z opisanymi wynikami, nakreślają szeroki zakres prac związany z możliwościami wykorzystania metody niskopolewego MRI w analizie procesów oraz właściwości fizycznych produktów pochodzenia roślinnego, podczas przechowywania oraz przetwarzania. Elementami wspólnymi przedstawionych zagadnień są: problematyka wyboru i przygotowania produktu, wypracowanie protokołu badania MRI

dającego w wyniku obrazu istotne morfologiczne, oraz zaproponowanie metody analizy obrazu prowadzącej do uzyskania ilościowych wyników.

Szczególny nacisk został przeze mnie położony na wybór produktu i procesu, tak aby dostosować je do ograniczeń metody niskopolowej. Pokazuję, że samo obrazowanie owoców i warzyw nie stanowi trudności nawet w niskim polu magnetycznym, ponieważ ich tkanka jest bogata w wodę [H1]. Z kolei zastosowanie systemu niskopolowego MRI do monitorowania przechowalniczych uszkodzeń tkanki owocu, dawało wyniki niosące istotnie różną informację, dla tej samej próbki, w całym cyklu przechowalniczym [H2]. Złote standardy badania stopnia nieodwracalnej elektroporacji błony komórkowej, w wyniku działania impulsowego pola elektrycznego, rozwinięte zostały o metodę MRI, pozyskując całkowicie nowe wyniki na temat ruchliwości jonów wewnątrz tkanki [H4]. W końcu pokazuję, że obrazy MR mogą nie tylko nieść informację o cechach morfologicznych produktów, odpowiadającym wyglądowi przekrojów badanych obiektów, ale również mogą dawać ilościowe wyniki na temat zachodzących wewnątrz procesów [H3, H5]. W drewnie zaproponowałem i wykonałem obrazowanie kanałów przepływu wody, w których woda może swobodnie przemieszczać się z prędkościami znacznie przekraczającymi transport dyfuzyjny [H3]. Makroskopowe próbki pozyskane z miąższu cukinii poddane wstępnej dehidrytacji w roztworze osmotycznym zostały zobrazowane, a wyniki ponownie ukazywały proces, w tym przypadku, wnikania soli do wnętrza miąższu cukinii [H5].

Sekwencje obrazujące i protokoły postępowania w czasie akwizycji danych, opracowane dla klinicznych wysokopolowych systemów MRI, nie mogły być bezpośrednio zaimplementowane w opisanej metodzie badawczej. Dlatego wykorzystałem obrazowanie zależne od czasu  $T_1$  [H2], które znacznie skraca czas akwizycji danych przy zachowanym stosunku sygnału do szumu. Natomiast w pracach [H3 – H5] proponuję wykorzystanie środków kontrastowych, które jednoznacznie określają miejsce w produkcie, z którego jest odbierany sygnał, skracając jednocześnie, aż stukrotnie, czas badania.

Ostatnim aspektem jest analiza wyników w celu pozyskania danych ilościowych. W ogólności pierwszy etap analizy obrazu MR sprowadza się do jego segmentacji, która pozwala na wyodrębnienie konkretnego obszaru zainteresowania. Eksperyment [H5] został tak zaplanowany, aby segmentacja polegała jedynie na binaryzacji obrazu, ponieważ sygnał był obecny lub nie. Najczęściej jednak, przejście z danego obszaru obrazu do sąsiedniego, jest ciągłe, a gradient intensywności sygnału między obszarami jest zróżnicowany. W pracy [H2] granicę pomiędzy zdrowym i chorym obszarem wyznaczono korzystając z analizy histogramów poziomów szarości na obrazach. W pracy [H4] ze względu na fakt, iż skóra bulwy ziemniaczanej była barierą dla wnikającego kontrastu uzyskano obrazy o symetrii osiowej. Stąd było możliwym uśrednienie sygnału w części środkowej obrazu i uzyskanie jednowymiarowych profili świadczących o głębokości wniknięcia jonów paramagnetycznych.

W zaprezentowanym cyklu prac pokazuję zatem, szereg interesujących i różnorodnych procesów zachodzących w produktach pochodzenia roślinnego, do analizy których, jako wiodące narzędzie, użyłem niskopolowego systemu MRI, wykazując jednocześnie na jego przydatność. Rozwijanie nowych metod badawczych pozwala z kolei na opracowanie nowych technologii uprawy, zbioru i przechowywania.

### 4.3.7 Literatura

- [1] Patel K.K., Khan M.A., Kar A. Recent development in applications of MRI techniques for foods and agricultural produce-an overview. (2015) *J. Food Sci. Technol.* 52, 1–26.
- [2] Kirtil E., Oztop M.H. <sup>1</sup>H Nuclear Magnetic Resonance Relaxometry and Magnetic Resonance Imaging and Applications in Food Science and Processing. (2015) *Food Eng. Rev.* 8, 1–22 .
- [3] Ahmed M.R., Yasmin J., Lee W.H., Mo C., Cho B.K. Imaging Technologies for Nondestructive Measurement of Internal Properties of Agricultural Products: A Review. (2017) *J. Biosyst. Eng.* 42, 199–216.
- [4] Pflugfelder D., Metzner R., van Dusschoten D., Reichel R., Jahnke S., Koller R. Non-invasive imaging of plant roots in different soils using magnetic resonance imaging (MRI). (2017) *Plant Methods* 13, 102–102.
- [5] Mazhar M., Joyce D., Cowin G., Brereton I., Hofman P., Collins R., Gupta M. Non-destructive <sup>1</sup>H-MRI assessment of flesh bruising in avocado (*Persea americana* M.) cv. Hass. (2015) *Postharvest Biol. Technol.* 100, 33–40.
- [6] Lv W., Zhang M., Wang Y., Adhikari B. Online measurement of moisture content, moisture distribution, and state of water in corn kernels during microwave vacuum drying using novel smart NMR/MRI detection system. (2018) *Dry. Technol.* 36, 1592–1602.
- [7] Zhou R., Mo Y., Li Y., Zhao Y., Zhang G., Hu Y. Quality and internal characteristics of Huanghua pears (*Pyrus pyrifolia* Nakai, cv. Huanghua) treated with different kinds of coatings during storage. (2008) *Postharvest Biol. Technol.* 49, 171–179.
- [8] Ruan R., Schmidt S. J., Schmidt A., Litchfield J. B. Nondestructive measurement of transient moisture profiles and the moisture diffusion coefficient in a potato during drying and absorption by NMR imaging. (1991) *J. Food Process Eng.* 14, 297–313.
- [9] Hernandez-Sanchez N., Barreiro P., Ruiz-Cabello J. On-line identification of seeds in mandarins with magnetic resonance imaging. (2006) *Biosyst. Eng.* 95, 529–536.
- [10] Srivastava R.K., Talluri S., Beebi S.K., Talluri S. Magnetic resonance imaging for quality evaluation of fruits: a review. (2018) *Food Anal. Methods.* 11, 2943–60.
- [11] Callaghan P. T. *Principles of Nuclear Magnetic Resonance Microscopy*, Clarendon Press, Oxford, 1991.
- [12] Borisjuk L., Rolletschek H., Neuberger T. Nuclear magnetic resonance imaging of lipid in living plants. (2013) *Prog. Lipid Res.* 52, 465–487.
- [13] Kamal, T., Cheng, S., Khan, I.A., Nawab, K., Zhang, T., Song, Y., Wang, S., Nadeem M., Riaz M., Khan M.A.U., Zhu B.-W., Tan M. (2019) Potential uses of LF-NMR and MRI in the study of water dynamics and quality measurement of fruits and vegetables. *J. Food Process. Preserv.* 43, e14202.
- [14] Wang S.Y., Wang P.C., Faust M., Non-destructive detection of watercore in apple with nuclear magnetic resonance imaging. (1988) *Sci. Hortic.* 35, 227–234.



- [15] Wang S.Y., Wang P.C., Non-destructive detection of core breakdown in 'Bartlett' pears with nuclear magnetic resonance imaging. (1989) *HortScience* 24, 106–109.
- [16] Clark C.J., Hockings P.D., Joyce D.C., Mazucco R.A. Application of magnetic resonance imaging to pre- and post-harvest studies of fruits and vegetables. (1997) *Postharvest Biol. Technol.* 11, 1–21.
- [17] Faust M., Wang P.C., Maas J., 1997. The use of magnetic resonance imaging in plant science. *Horticulture Review*, 20, 225-266.
- [18] Zion B., Chen P., McCarthy J., Detection of bruises in magnetic resonance images of apples. (1995) *Comput. Electron. Agric.* 13, 289–299.
- [19] Clark C.J., MacFall J.S., Bielecki R.L. Loss of watercore from 'Fuji' apple observed by magnetic resonance imaging. (1998) *Sci. Hortic.* 73, 213–227.
- [20] Barreiro P., Ruiz-Cabello J., Fernandez-Valle M.E., Ortiz C., Ruiz-Altisent M. Mealiness assessment in apples using MRI techniques. (1999) *Magn. Reson. Imaging* 17, 275–281.
- [21] Lammertyn J., Dresselaers T., Van Hecke P., Jancsok P., Wevers M., Nicolai B.M. MRI and X-ray CT study of spatial distribution of core breakdown in 'Conference' pears. (2003a) *Reson. Imaging* 21, 805–815.
- [22] Lammertyn J., Dresselaers T., Van Hecke P., Jancsok P., Wevers M., Nicolai B.M. Analysis of the time course of core breakdown in 'Conference' pears by means of MRI and X-ray CT. (2003b) *Postharvest Biol. Technol.* 29, 19–28.
- [23] Nguyen T.A., Dresselaers T., Verboven P., D'hallewin G., Culeddu N., Van Hecke P., Nicolai B.M., Finite element modelling and MRI validation of 3D transient water profiles in pears during postharvest storage. (2006) *J. Sci. Food Agric.* 86, 745–756.
- [24] Hernández-Sánchez N., Hills B.P., Barreiro P., Marigheto N., An NMR study on internal browning in pears. (2007) *Postharvest Biol. Technol.* 44, 260–270.
- [25] Geya Y., Kimura T., Fujisaki H., Terada Y., Kose K., Haishi T., Gemma H., Sekozawa Y., Longitudinal NMR parameter measurements of Japanese pear fruit during the growing process using a mobile magnetic resonance imaging system. (2013) *J. Magn. Reson.* 226, 45–51.
- [26] Bottomley P.A., Rogers H.H., Foster T.H. NMR imaging shows water distribution and transport in plant root systems in situ. (1986) *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 83, 87–89.
- [27] Dusschoten D., Metzner R., Kochs J., Postma J.A., Pflugfelder D., Quantitative 3D analysis of plant roots growing in soil using magnetic resonance imaging. (2016) *Plant Physiol.* 170, 1176–1188.
- [28] van As H., Scheenen T., Vergeldt F.J. MRI of intact plants. (2009) *Photosynth. Res.* 102, 213–222.
- [29] Krug J.R., van Schadewijk R., Vergeldt F.J., Webb A.G., de Groot H.J.M., Alia A., Van As H., Velders A.H. Assessing spatial resolution, acquisition time and signal-to-noise ratio for commercial microimaging systems at 14.1, 17.6 and 22.3 T. (2020) *J. Magn. Reson.* 316, 106770.

- [30] Middleton H., Black R.D., Saam B., Cates G.D., Cofer G.P., Guenther R., Happer W., Hedlund L.W., Johnson G.A., Juvan K., Swarz J., MR imaging with hyperpolarized  $^3\text{He}$  gas. (1995) *Magn. Reson. Med.* 33, 271–275.
- [31] Kauczor H.U., Ebert M., Kreitner K.F., Nilgens H., Surkau R., Heil W., Hofmann D., Otten E.W., Thelen M. Imaging of the lungs using  $^3\text{He}$  MRI: preliminary clinical experience in 18 patients with and without lung disease. (1997) *J. Magn. Reson. Imaging* 7, 538–543.
- [32] Guillot G., Nacher P.-J., Tastevin G., NMR diffusion of hyperpolarised He-3 in aerogel: a systematic pressure study. (2001) *Magn. Reson. Imaging* 19, 391–394.
- [33] Pasanen A.-L., Rautiala S., Kasanen J.-P., Raunio P., Rantamäki J., Kalliokoski P. The relationship between measured moisture conditions and fungal concentrations in water-damaged building materials. (2000) *Indoor Air* 11, 111–120.
- [34] Carlquist S. *Comparative Wood Anatomy Systematic, Ecological, and Evolutionary Aspects of Dicotyledon Wood*, second ed. Springer, New York, USA, 2001.
- [35] Kuroda K., Kanbara Y., Inoue T., Ogawa A. Magnetic resonance microimaging of xylem sap distribution and necrotic lesions in tree stems. (2006) *IAWA J.* 27, 3–17.
- [36] Meder R., Codd S.L., Franich R.A., Callaghan P.T., Pope J.M., Observation of anisotropic water movement in *Pinus radiata* D. Don sapwood above fiber saturation using magnetic resonance micro-imaging. (2003) *Holz Roh Werkst.* 61, 251–256.
- [37] Vaziri M., Oradd G., Lindgren O., Pizzi A., Magnetic resonance imaging of water distribution in welded woods. (2011) *J. Adhes. Sci. Technol.* 25, 1997–2003.
- [38] Wang P.C., Chang S.J., Nuclear magnetic resonance imaging of wood. (1986) *Wood Fiber Sci.* 18, 308–314.
- [39] Araujo C.D., MacKay A.L., Hailey J.R.T., Whittall K.P., Le H. Proton magnetic resonance techniques for characterization of water in wood: application to white spruce. (1992) *Wood Sci. Technol.* 26, 101–113.
- [40] Hameury S., Sterley M. Magnetic resonance imaging of moisture distribution in *Pinus sylvestris* L. exposed to daily indoor relative humidity fluctuations. (2006) *Wood Mater. Sci. Eng.* 1, 116–126.
- [41] Quick J.J., Hailey J.R.T., Mackay A.L. Radial moisture profiles of cedar sapwood during drying – a proton magnetic-resonance study. (1990) *Wood Fiber Sci.* 22, 404–412.
- [42] Xu Y., Araujo C.D., MacKay A.L., Whittall K.P., Proton spin-lattice relaxation in wood –  $T_1$  related to local specific gravity using a fast-exchange model. (1996) *J. Magn. Reson. Ser. B* 110, 55–64.
- [43] Almeida G., Leclerc S., Perre P. NMR imaging of fluid pathways during drainage of softwood in a pressure membrane chamber. (2008) *Int. J. Multiphase Flow* 34, 312–321.
- [44] Kekkonen P.M., Ylisassi A., Telkki V.-V. Absorption of water in thermally modified pine wood as studied by nuclear magnetic resonance. (2014) *J. Phys. Chem. C* 118, 2146–2153.

- [45] Ilvonen K., Palva L., Peramaki M., Joensuu R., Sepponen R. MRI-based D<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub>O-contrast method to study water flow and distribution in heterogeneous systems: demonstration in wood xylem. (2001) *J. Magn. Reson.* 149, 36–44.
- [46] Eberhardt T.L., So C.-L., Herlihy A.H., So P.-W. Use of gadolinium chloride as a contrast agent for imaging spruce knots by magnetic resonance. (2006) *Wood Fiber Sci.* 38, 527–534.
- [47] Telkki V.-V., Saunavaara J., Jokisaari J. Time-of-flight remote detection MRI of thermally modified wood. (2010a) *J. Magn. Reson.* 202, 78–84.
- [48] Telkki V.-V., Zhivonitko V.V., Ahola S., Kovtunov K.V., Jokisaari J., Koptuyg I.V. Microfluidic gas-flow imaging utilizing parahydrogen-induced polarization and remote-detection NMR. (2010b) *Angew. Chem. Int. Ed.* 49, 8363–8366.
- [49] Angersbach A., Heinz V., Knorr D. Effects of pulsed electric fields on cell membranes in real food systems. (2000) *Innovat. Food Sci. Emerg. Technol.* 1, 135–149.
- [50] Barbosa-Canovas G.V., Altunakar B. Pulsed electric fields processing of foods: an overview. In: Raso, J., Heinz, V. (Eds.), *Pulsed Electric Fields Technology for the Food Industry*. Food Engineering Series. Springer, Boston, MA. 2006.
- [51] Toepfl S., Siemer C., Saldana-Navarro G., Heinz V. Chapter 6-Overview of pulsed electric fields processing for food. In: Sun, D.-W. (Ed.), *Emerging Technologies for Food Processing*, second ed. Academic Press, San Diego, p. 93–114. 2014.
- [52] Kethireddy, V., Oey, I., Jowett, T., Bremer, P., 2016. Critical analysis of the maximum non inhibitory concentration (MNIC) method in quantifying sub-lethal injury in *Saccharomyces cerevisiae* cells exposed to either thermal or pulsed electric field treatments. *Int. J. Food Microbiol.* 233, 73–80.
- [53] Timmermans R.A.H., Nederhoff A.L., Nierop Groot M.N., van Boekel, M.A.J.S., Mastwijk H.C. Effect of electrical field strength applied by PEF processing and storage temperature on the outgrowth of yeasts and moulds naturally present in a fresh fruit smoothie. (2016) *Int. J. Food Microbiol.* 230, 21–30.
- [54] Shorstkii I., Mirshekarloo M.S., Koshevoi E. Application of pulsed electric field for oil extraction from sunflower seeds: electrical parameter effects on oil yield. (2017) *J. Food Process. Eng.* 40, 1–7.
- [55] Saldana G., Cebrian G., Abenoza M., Sanchez-Gimeno C., Alvarez I., Raso J. Assessing the efficacy of PEF treatments for improving polyphenol extraction during red wine vinifications. (2017) *Innovat. Food Sci. Emerg. Technol.* 39, 179–187.
- [56] Buniowska M., Carbonell-Capella J.M., Frigola A., Esteve M.J., Bioaccessibility of bioactive compounds after non-thermal processing of an exotic fruit juice blend sweetened with *Stevia rebaudiana*. (2017) *Food Chem.* 221, 1834–1842.
- [57] Tian M.-l., Fang T., Du M.-y, Zhang F.-s., Effects of pulsed electric field (PEF) treatment on enhancing activity and conformation of alpha-amylase. (2016) *Protein J.* 35, 154–162.

- [58] Oey I., Faridnia F., Leong S.Y., Burritt D.J., Liu T. Determination of pulsed electric fields effects on the structure of potato tubers. In: Miklavcic, Damijan (Ed.), *Handbook of Electroporation*. Springer International Publishing. 2016.
- [59] Angersbach A., Heinz V., Knorr D. Evaluation of process-induced dimensional changes in the membrane structure of biological cells using impedance measurement. (2002) *Biotechnol. Prog.* 18, 597–603.
- [60] Lebovka N.I., Bazhal M.I., Vorobiev E. Estimation of characteristic damage time of food materials in pulsed-electric fields. (2001) *J. Food Eng.* 54, 337–346.
- [61] Hjouj M., Rubinsky B. Magnetic Resonance Imaging characteristics of nonthermal irreversible electroporation in vegetable tissue. (2010) *J. Membr. Biol.* 236, 137–146.
- [62] Castellví Q., Banús J., Ivorra A. 3D assessment of irreversible electroporation treatments in vegetal models. In: Jarm, T., Kramar, P. (Eds.), *1st World Congress on Electroporation and Pulsed Electric Fields in Biology, Medicine and Food & Environmental Technologies*. Springer, Singapore. 2016.
- [63] Ersus S., Barrett D.M. Determination of membrane integrity in onion tissues treated by pulsed electric fields: use of microscopic images and ion leakage measurements. (2010) *Innovat. Food Sci. Emerg. Technol.* 11, 598–603.
- [64] Faridnia F., Burritt D.J., Bremer P.J., Oey I. Innovative approach to determine the effect of pulsed electric fields on the microstructure of whole potato tubers: use of cell viability, microscopic images and ionic leakage measurements. (2015) *Food Res. Int.* 77, 556–564.
- [65] Thybo A.K., Andersen H.J., Karlsson A.H., Dønstrup S., Stødkilde-Jørgensen H. Low-field NMR relaxation and NMR-imaging as tools in differentiation between potato sample and determination of dry matter content in potatoes. (2003) *LWT - Food Sci. Technol.* 36, 315–322.
- [66] Thybo A.K., Sune N.J., Lærke P.E., Stødkilde-Jørgensen H.J. Nondestructive detection of internal bruise and spraing disease symptoms in potatoes using magnetic resonance imaging. (2004) *Magn. Reson. Imag.* 22, 1311–1317.
- [67] Cieurzyńska A., Kowalska H., Czajkowska K., Lenart A. Osmotic dehydration in production of sustainable and healthy food. (2016) *Trends Food Sci. Technol.* 50, 186–192.
- [68] Muñoz-Becera S., Mendez-Lagunas L.L., Rodriguez-Ramirez J. Solute Transfer in Osmotic Dehydration of Vegetable Foods: A Review. (2017) *J. Food Sci.* 82, 2251–2259.
- [69] Ramya V., Jain N.K. A Review on Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetables: An Integrated Approach. (2017) *J. Food Process Eng.* 40, e12440.
- [70] Duce S.L., Carpenter T.A., Hall L.D. Nuclear magnetic resonance imaging of fresh and frozen courgettes. (1992) *J. Food Eng.* 16, 165–172.
- [71] Rossi G., Socciarelli S., Aromolo R., Ciampa A., Beni C. The effects of mineral and organic fertilizers on zucchini (*Cucurbita pepo* L.) investigated by the multiparameters analyses and magnetic resonance imaging (MRI). (2016) *Agrochimica* 60, 275–287.

[72] Evans S.D., Brambilla A., Lane D.M., Torreggiani D., Hall L.D. Magnetic resonance imaging of strawberry (*Fragaria vesca*) slices during osmotic dehydration and air drying. (2002) LWT-Food Sci. Technol. 35, 177–184.

[73] Mazonakis, M., Damilakis, J., Maris, T., Prassopoulos, P., Gourtsoyiannis, N. Comparison of Two Volumetric Techniques for Estimating Liver Volume Using Magnetic Resonance Imaging. (2002) J. Magn. Reson. Imaging 15, 557–563.

[74] Chandra, R., Rusinek, H. Tissue volume determinations from brain MRI images: A phantom study. In Medical Imaging V: Image Processing; International Society for Optics and Photonics: Bellingham, WA, USA, 1991 pp. 133–144.

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowych

Poniżej przedstawiam moje najważniejsze osiągnięcia naukowe nieujęte w punkcie 4.2

### Artykuły opublikowane przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora

[P1] Suchanek K., Cieślak K., Olejniczak Z., Pałasz T., **Suchanek M.**, Dohnalik T. Hyperpolarized  $^3\text{He}$  gas production by metastability exchange optical pumping for magnetic resonance imaging. (2005) Optica Applicata 35(2), 263-276.

IF<sub>2005</sub> = 0,459, MNiSW<sub>2013\_2016</sub> = 15 pkt., MNiSW<sub>po 2019</sub> = 40 pkt.

*Mój wkład w powstanie pracy polegał na współudziale w budowie niskopolowego polaryzatora gazu  $^3\text{He}$ , przy czym prace związane były głównie z badaniami polaryzacji w jednorodnym polu magnetycznym.*

[P2] Cieślak K., Dohnalik T., Olejniczak Z., Pałasz T., Suchanek K., **Suchanek M.** Magnetic resonance imaging using optically polarized  $^3\text{He}$ . (2005) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 5849(06), 41-46.

Praca z poza bazy JCR.

*Mój wkład w powstanie pracy polegał na współudziale w budowie niskopolowego polaryzatora gazu  $^3\text{He}$ , oraz systemu do obrazowania MR.*

[P3] **Suchanek M.**, Cieślak K., Pałasz T., Suchanek K., Dohnalik T., Olejniczak Z. Magnetic resonance imaging at low magnetic field using hyperpolarized  $^3\text{He}$  gas. (2005) Acta Physica Polonica A 107(3), 491-506.

IF<sub>2005</sub> = 0,394, MNiSW<sub>2013\_2016</sub> = 15 pkt., MNiSW<sub>po 2019</sub> = 40 pkt.

*Mój wkład w powstanie pracy był większościowy, polegał na współudziale: w budowie niskopolowego polaryzatora gazu  $^3\text{He}$ , wytworzeniu spolaryzowanego gazu  $^3\text{He}$ , ale przede wszystkim na budowie niskopolowego systemu MRI i wykonaniu obrazowania MR spolaryzowanego gazu. Brałem udział w dyskusji i analizie wyników oraz pisaniu manuskryptu.*

## Artykuły opublikowane po uzyskaniu stopnia naukowego doktora

[P4] Suchanek K., **Suchanek M.**, Nikiel A., Pałasz T., Abboud M., Sinatra A., Nacher P.-J., Tastevin G., Olejniczak Z., Dohnalik T. Optical measurement of  $^3\text{He}$  nuclear polarization for metastable exchange optical pumping studies at high magnetic field. (2007) European Physical Journal: Special Topics 144(1), 67-74.

IF<sub>2007</sub> = --, MNiSW<sub>2013\_2016</sub> = 30 pkt., MNiSW<sub>po 2019</sub> = 70 pkt.

*Mój wkład w powstanie pracy polegał na współudziale w tworzeniu nowego laboratorium wyposażonego w magnes nadprzewodzący oraz w wypracowaniu koncepcji układu pomiarowego do pomiaru polaryzacji. Brałem udział w dyskusji i analizie wyników oraz pisaniu manuskryptu.*

[P5] Nikiel A., Pałasz T., **Suchanek M.**, Abboud M., Sinatra A., Olejniczak Z., Dohnalik T., Tastevin G., Nacher P.-J. Metastability exchange optical pumping of  $^3\text{He}$  at high pressure and high magnetic field for medical applications. (2007) European Physical Journal: Special Topics 144(1), 255-263.

IF<sub>2007</sub> = --, MNiSW<sub>2013\_2016</sub> = 30 pkt., MNiSW<sub>po 2019</sub> = 70 pkt.

*Mój wkład w powstanie pracy polegał na współudziale w pomiarach polaryzacji  $^3\text{He}$  w wysokim polu magnetycznym. Brałem udział w dyskusji i analizie wyników oraz pisaniu manuskryptu.*

[P6] Dohnalik T., Nikiel A., Pałasz T., **Suchanek M.**, Collier G., Greńczuk M., Głowacz B., Olejniczak, Z. Optimization of the pumping laser beam spatial profile in the MEOP experiment performed at elevated  $^3\text{He}$  pressures. (2011) EPJ Applied Physics 54(2), ap100493.

IF<sub>2011</sub> = 0.771, MNiSW<sub>2013\_2016</sub> = 20 pkt., MNiSW<sub>po 2019</sub> = 40 pkt.

*Mój wkład w powstanie pracy polegał na współudziale w dyskusji i analizie wyników oraz pisaniu manuskryptu.*

[P7] Collier G., **Suchanek M.**, Wojna A., Cieślar K., Pałasz T., Głowacz B., Olejniczak Z., Dohnalik T. Metastability exchange optical pumping low field polarizer for lung magnetic resonance imaging. (2012) Optica Applicata 42(1), 223-239.

IF<sub>2012</sub> = 0.541, MNiSW<sub>2013\_2016</sub> = 15 pkt., MNiSW<sub>po 2019</sub> = 40 pkt.

*Mój wkład w powstanie pracy polegał na współudziale w budowie, a przede wszystkim w pracach optymalizacyjnych polaryzatora  $^3\text{He}$ . Brałem także czynny udział w procesie produkcji gazu na rzecz obrazowania płuc metodą MRI.*

[P8] Collier G., Pałasz T., Wojna A., Głowacz B., **Suchanek M.**, Olejniczak Z., Dohnalik T. A high-field  $^3\text{He}$  metastability exchange optical pumping polarizer operating in a 1.5 T medical scanner for lung magnetic resonance imaging. (2013) Journal of Applied Physics 113(20), 204905.



IF<sub>2013</sub> = 2.185, MNiSW<sub>2013\_2016</sub> = 35 pkt., MNiSW<sub>po 2019</sub> = 70 pkt.

*Mój wkład w powstanie pracy polegał na współudziale w dyskusji na temat koncepcji powstania polaryzatora wysokopolowego oraz na współudziale w badaniach w szpitalu JP II w Krakowie.*

[P9] Dohnalik T., Głowacz B., Olejniczak Z., Pałasz T., **Suchanek M.**, Wojna A. Spectroscopic issues in optical polarization of <sup>3</sup>He gas for Magnetic Resonance Imaging of human lungs. (2013) European Physical Journal: Special Topics 222(9), 2103-2118.

IF<sub>2013</sub> = 1.760, MNiSW<sub>2013\_2016</sub> = 30 pkt., MNiSW<sub>po 2019</sub> = 70 pkt.

*Mój wkład w powstanie pracy polegał na współudziale w dyskusji na temat koncepcji pracy. Byłem także zaangażowany w redagowanie manuskryptu.*

[P10] Głowacz B., **Suchanek M.**, Olejniczak Z. Production of laser-polarized <sup>3</sup>He gas via metastability exchange optical pumping for magnetic resonance imaging. (2014) Bio-Algorithms and Med-Systems, 10(3), 129–137.

Praca z poza bazy JCR. MNiSW<sub>2013\_2016</sub> = 8 pkt., MNiSW<sub>po 2019</sub> = 20 pkt.

*Praca ma charakter przeglądkowy. Mój wkład polegał na współudziale w dyskusji na temat koncepcji pracy oraz jej pisaniu.*

[P11] Pałasz T., Mikowska L., Głowacz B., Olejniczak Z., **Suchanek M.**, Dohnalik T. Stop-Flow SEOP Polarizer for <sup>129</sup>Xe. (2019) Acta Phys. Pol. B, 136, 1008–1017.

IF<sub>2019</sub> = 0.579, MNiSW<sub>2013\_2016</sub> = 20 pkt., MNiSW<sub>po 2019</sub> = 40 pkt.

*Mój wkład w powstanie pracy polegał na współudziale w dyskusji na temat koncepcji pracy i analizy wyników. Byłem także zaangażowany w pomiary na urządzeniach MRI: niskopolowym i klinicznym.*

[P12] Kordulasiński R., Królewska M., Głowacz B., Mikowska L., Olejniczak Z., Pałasz T., **Suchanek M.**, Filipow W., Dohnalik T. A Novel System for Patient Ventilation and Dosing of Hyperpolarized <sup>3</sup>He for Magnetic Resonance Imaging of Human Lungs. (2020) *Appl. Sci.*, 10, 3163.

IF<sub>2019</sub> = 2.474, MNiSW<sub>2013\_2016</sub> = 25 pkt., MNiSW<sub>po 2019</sub> = 70 pkt.

*Mój wkład polegał na współudziale w dyskusji na temat koncepcji pracy i metodologii pomiarowej. Byłem także zaangażowany we wszelkie pomiary związane z projektem wentylatora do gazów HP, oraz pisanie manuskryptu. Jestem autorem korespondencyjnym powyższej pracy.*

[P13] Suchanek K., Bartkowiak A., Gdowik A., Perzanowski M., Kąc S., Szaraniec B., **Suchanek M.**, Marszałek M. Crystalline hydroxyapatite coatings synthesized under hydrothermal conditions on modified titanium substrates. *Mater. Sci. Eng. C* 2015, 51, 57–63.

IF<sub>2015</sub> = 3.420, MNiSW<sub>2013\_2016</sub> = 30 pkt., MNiSW<sub>po 2019</sub> = 140 pkt.

*Mój wkład polegał na wykonaniu i interpretacji wyników spektroskopii w podczerwieni.*

### **5.1 Praca naukowa w okresie przed uzyskaniem stopnia doktora**

W trakcie studiów doktoranckich na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego (2000–2005) zajmowałem się tematyką związaną z zastosowaniem hiperspolaryzowanego gazu  $^3\text{He}$  do wykorzystania w obrazowaniu MR. Temat pracy doktorskiej: „Tomograf magnetycznego rezonansu jądrowego do obrazowania z użyciem hiperspolaryzowanego  $^3\text{He}$ ” bezpośrednio korespondował z zadaniem krakowskiej grupy w realizacji europejskiego projektu badawczego 5tego Programu Ramowego UE: “*Magnetic Resonance Imaging Using Hyperpolarized Helium Gas as a Tool for Diagnosis of Selected Respiratory Diseases*” (akronim: PHIL), w którym byłem wykonawcą. Zadanie badawcze było interdyscyplinarne, łączyło zagadnienia optycznej polaryzacji gazów szlachetnych z obrazowaniem MR. Brałem udział, zarówno w pracach związanych z optymalizacją procesu pompowania optycznego [P1, P2], jak również w uruchomieniu pierwszego w Polsce niskopolewego urządzenia MRI do obrazowania płuc z wykorzystaniem gazów spolaryzowanych [P3]. Najistotniejszym osiągnięciem było wykonanie obrazów płuc szczurzych *in-vivo* przy pomocy niskopolewego (0.088 T), niekomercyjnego tomografu, którego dużą zaletą jest fakt, że oprócz obrazowania  $^3\text{He}$ , można go zastosować do klasycznego obrazowania protonowego.

### **5.2 Praca naukowa w okresie po uzyskaniu stopnia doktora**

Zatrudnienie w Zakładzie Fizyki Akademii Rolniczej im. Hugona Kołłątaja w Krakowie pozwoliło na kontynuowanie współpracy z grupą Optycznej Polaryzacji Gazów Szlachetnych z Zakładu Optyki Atomowej w Wydziale Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego. Mój udział w badaniach wspomnianej grupy był możliwy dzięki dużym projektom badawczym.

Jako kontynuacja europejskiego programu PHIL powstała sieć badawcza PHeLINet (*Polarized Helium Lung Imaging Network*) współfinansowana ze środków 6tego Programu Ramowego UE (2007-2011). Głównym celem krakowskiej grupy było doprowadzenie do powstania pierwszego w Polsce obrazu MR ludzkich płuc wypełnionych spolaryzowanym helem. Prace przebiegały dwutorowo. W IF UJ powstał wydajny niskopolewy polaryzator  $^3\text{He}$ . Zasada działania polega na wprowadzeniu do komory optycznej (KO) izotopu  $^3\text{He}$  pod niskim ciśnieniem rzędu 1 mbara. Atomy  $^3\text{He}$  w KO są wzbudzane w wyniku przyłożenia wyładowania radiowej częstotliwości. Wzbudzone atomy  $^3\text{He}$  znajdują się w stanie metastabilnym i oddziałują ze światłem laserowym, spolaryzowanym kołowo, o długości fali 1083 nm i mocy 10 W. Następnie w wyniku zderzeń między frakcją atomów w stanie podstawowym z frakcją atomów w stanie wzbudzonym, następuje przeniesienie polaryzacji jądrowej do atomów w stanie podstawowym. Atomy gazu szlachetnego uzyskują hiperspolaryzację. Z KO następuje transfer gazu do komory magazynującej przy pomocy specjalnie zaprojektowanej kompresującej pompy perystaltycznej. Cały proces przebiega w niedużym, ale jednorodnym, zewnętrznym polu magnetycznym, które zapobiega natychmiastowej relaksacji gazu. Aby zastosować spolaryzowany gaz do obrazowania w klinicznym tomografie MRI konieczny jest transport do współpracującego szpitala JP II w Krakowie. Wynik prac wraz z końcowym efektem w postaci uzyskanego obrazu przestrzeni płucnej opisany jest pozycji [P7].



Równolegle z opisanymi powyżej pracami aplikacyjnymi wraz z badaczami z francuskiego laboratorium Kastlera Brossela z Ecole Normale Supérieure w Paryżu rozpoczęliśmy badania nad hiperpolaryzacją  $^3\text{He}$  metodą optycznego pompowania z wymianą metastabilności w warunkach niestandardowych, to jest w obecności wysokiego pola magnetycznego i w warunkach relatywnie wysokiego ciśnienia [P4, P5]. Jednym z istotnych osiągnięć była analiza rozkładu plazmy w komórce optycznej. Doprowadziła ona do wymiany teleskopów kształtujących laserową wiązkę pompującą z typowych Keplerowskich na teleskopy wykonane na bazie aksikonów [P6]. Efekt opisanych powyżej intensywnych badań to powstanie pierwszego na świecie polaryzatora wysokopolowego, pracującego bezpośrednio w klinicznym środowisku MRI [P8, P9].

Pomimo ciągłego rozwoju metody optycznego pompowania  $^3\text{He}$  z wymianą metastabilności (*MEOP* ang. *Metastability Exchange Optical Pumping*) [P10], ze względu na występującą od paru lat zaporową cenę izotopu  $^3\text{He}$ , zdecydowano o podjęciu badań alternatywnych, w których spolaryzowany gaz, izotop  $^{129}\text{Xe}$ , otrzymuje się na drodze pompowania optycznego z wymianą spinów (*SEOP*, ang. *Spin Exchange Optical Pumping*) [P11]. W 2015 powołano konsorcjum trzech krakowskich ośrodków: IF UJ, Krakowski Szpital Specjalistyczny im. Jana Pawła II oraz firma Transcom International Sławomir Śleziak, Winicjusz Filipow sp.j., które otrzymało finansowanie z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju dla projektu „Metoda obrazowania płuc magnetycznym rezonansem w warunkach klinicznych przy użyciu optycznie spolaryzowanych gazów szlachetnych” PBS/A9/35/2015 (2015-2018). Brałem udział w badaniach prowadzonych w ramach tego projektu, a mój udział dotyczył przede wszystkim wdrożenia procedury obrazowania MR w celu uzyskania obrazów MR o wartości diagnostycznej dla zdrowych ochotników [P12].

W latach 2011–2013 rozpocząłem współpracę z Zakładem Tomografii Magnetyczno-Rezonansowej Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, gdzie uczestniczyłem w badaniach obrazowania MR czynnościowego i molekularnego, w ramach projektu „Śródbłonek naczyńniowy w chorobach cywilizacyjnych: od badań poznawczych do oferty innowacyjnego leku o działaniu śródbłonkowym”. Badania prowadziłem u boku dr T. Skórki (IFJ PAN) pod kierownictwem prof. dr hab. S. Chłopickiego z JCET w Krakowie (Jagiellonian Centre for Experimental Therapeutics). Moje zadanie polegało na próbie utworzenia modelu zwierzęcego stosunkowo nieinwazyjnego zawału mięśnia sercowego na modelu myszy z podwójnym nokautem genetycznym apoE/LDLR<sup>-/-</sup>. Szczep apoE/LDLR<sup>-/-</sup> jest wyjątkowo nieodporny na hipoksję, co stanowi bazę do indukcji zawału serca.

Korzystając z infrastruktury badawczej UR prowadziłem również badania w zakresie spektroskopii w podczerwieni. W wyniku tych badań, we współpracy z Zakładem Materiałów Magnetycznych i Nanostruktur Instytutu Fizyki Jądrowej PAN, powstała praca [P13] gdzie wykorzystałem spektrometr podczerwieni FT-IR (znajdujący się na Katedrze Chemii i Fizyki UR) do badań warstw hydroksyapatytu syntezowanych w warunkach wysokiej temperatury i wysokiego ciśnienia na podłożu tytanowym. Tego typu badania, gdzie metal pokrywa się warstwą bioaktywną i biogodną, mają potencjalne zastosowanie w inżynierii biomedycznej.

## **6. Osiągnięcia dydaktyczne, organizacyjne oraz popularyzujące naukę**

### **6.1 Działalność dydaktyczna**

#### **Działalność przed uzyskaniem stopnia doktora**

W trakcie studiów doktoranckich w IF UJ prowadziłem zajęcia laboratoryjne z fizyki dla studentów Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, w wymiarze 130 h/rok przez okres trzech lat.

#### **Działalność po uzyskaniu stopnia doktora**

1. Prowadziłem/prowadzę zajęcia laboratoryjne i rachunkowe z „Fizyki” oraz „Agrofizyki” dla studentów UR studiujących na następujących wydziałach: Wydział Rolniczo-Ekonomiczny, Wydział Leśny, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Wydział Biotechnologii i Ogrodnictwa, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Wydział Technologii Żywności.
2. Koordynuję i jestem wykładowcą przedmiotu „Fizyka” dla studentów 1 roku Wydziału Inżynierii Produkcji i Energetyki.
3. Koordynuję i jestem wykładowcą przedmiotu „Fizyka” dla studentów 1 roku Wydziału Technologii Żywności.
4. Współpracowałem przy realizacji dwóch prac magisterskich:
  - Bartosz Proniewski „Budowa cewki wysokiej częstotliwości do rezonansu magnetycznego przy 0,088 T” – praca magisterska pod kierownictwem prof. dr hab. Henryka Figła, AGH, obroniona 2009.
  - Marta Kordulska „Obrazowanie magnetyczno-rezonansowe wybranych owoców” – praca magisterska pod kierownictwem prof. dr hab. Henryka Figła, AGH, obroniona 2015.

### **6.2 Osiągnięcia organizacyjne i popularyzujące naukę**

#### **Działalność przed uzyskaniem stopnia doktora**

1. Członek komitetu organizacyjnego międzynarodowej konferencji „Photons, Atoms and All That” Kraków, Polska, 2002.
2. Udział w Dniach Otwartych IF UJ, 2000–2005.
3. Udział w pierwszych edycjach Festiwalu Nauki i Sztuki w Krakowie z ramienia IF UJ, 2002–2003.

#### **Działalność po uzyskaniu stopnia doktora**

1. Udział w „Małopolskiej Nocy Naukowców” z ramienia IFJ PAN, 2012–2013.
2. Udział w „Festiwalu Nauki i Sztuki w Krakowie” z ramienia IFJ PAN, 2012–2013.
3. Udział w „Małopolskiej Nocy Naukowców” z ramienia UR, 2015–2019.
4. Udział w „Festiwalu Nauki i Sztuki w Krakowie” z ramienia UR, 2015–2019.

## 7. Nagrody i wyróżnienia

1. Działalność naukowa stanowiła podstawę do przyznania indywidualnej Nagrody Rektora (III<sup>o</sup>) w 2014 roku.
2. Wyróżnienie publikacji *T. Dohnalik, A. Nikiel, T. Pałasz, M. Suchanek, G. Collier, M. Greńczuk, B. Głowacz, Z. Olejniczak "Optimization of the pumping laser beam spatial profile in the MEOP experiment performed at elevated <sup>3</sup>He pressures". Eur. Phys. J. Appl. Phys. 54, 20802 (2011): przedruk w skróconej formie w czasopiśmie: Europhysics News, Issue 42/3 (2011) w sekcji „Hightlight”.*

*Motera Suchanek*