

**Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
w Lublinie**

ACTA AGROPHYSICA

16

**Wiktor Pietrzyk, Stanisław Grundas,
Marek Horyński, Andrzej Sumorek**

**WYKORZYSTANIE POLA ELEKTROSTATYCZNEGO
I OZONU DO OBNIŻANIA ENERGOCHŁONNOŚCI
PROCESU SUSZENIA ZIARNA ZBÓŻ**

Lublin 1998

Komitet redakcyjny

prof. dr hab. Jan Gliński, czł. koresp. PAN
prof. dr hab. Krystyna Konstankiewicz
doc. dr hab. Ryszard Dębicki

Opiniował do druku

prof. dr hab. Roman Koper

Redakcja techniczna

dr Ewa Sikora

Adres redakcji

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
ul. Doświadczalna 4, P.O. Box 201, 20-290 Lublin 27
tel. (0-81) 744-50-61

Publikacja indeksowana przez
Polish Scientific Journals Contents - Agric. & Biol. Sci.
w sieci Internet pod adresem <http://saturn.ci.uw.edu.pl/psjc/>
lub <http://ciuw.warman.net.pl/alf/psjc/>

Publikacja finansowana przez Komitet Badań Naukowych w ramach projektu badawczego
nr 5 P06F 001 11 w latach 1996-1998

© Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 1998

ISBN 83-87385-20-4
ISSN 1234-4125

Wydanie I. Nakład 100 egz. Ark. wyd. 6,1
Skład komputerowy: mgr inż. Andrzej Sumorek
Druk: "Tekst", ul. 1 Maja 51, 20-410 Lublin

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE.....	5
2. BUDOWA ZIARNIAKA ZBÓŻ.....	8
2.1. Morfologia ziarniaka pszenicy	8
2.2. Anatomia ziarniaka pszenicy.....	8
3. WPŁYW POLA ELEKTRYCZNEGO I NAPRĘŻEŃ MECHANICZNYCH NA WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNE ZIARNIAKA.....	14
3.1. Zależność rezystancji ziarniaka zbóż od naprężeń mechanicznych	14
3.2. Zależność rezystancji ziarniaka zbóż od natężenia pola elektrostatycznego.....	18
3.3. Przenikalność elektryczna ziarniaków zbóż w funkcji naprężeń mechanicznych.....	20
3.4. Zależność przenikalności elektrycznej ziarniaków zbóż od natężenia pola elektrostatycznego	23
4. WYKORZYSTANIE ELEKTRYCZNYCH WŁAŚCIWOŚCI ZIARNIAKÓW ZBÓŻ WE WSPÓŁCZESNYCH TECHNOLOGIACH SUSZENIA	29
4.1. Zastosowanie częstotliwości radiowych.....	33
4.2. Zastosowanie częstotliwości mikrofalowych	37
5. TEORETYCZNE PODSTAWY ROZWOJU NOWYCH TECHNOLOGII SUSZENIA Z UDZIAŁEM POLA ELEKTRYCZNEGO I OZONU	40
5.1. Zastosowanie wiatru jonowego	40
5.2. Zastosowanie ozonu	46
5.3. Zastosowanie sił strykcyjnych.....	49
6. BADANIA WPŁYWU POLA ELEKTROSTATYCZNEGO NA KINETYKĘ SUSZENIA ZIARNA PSZENICY	51
6.1. Stanowisko badawcze.....	51
6.2. Przebieg konwekcyjnego suszenia ziarna pszenicy w jednorodnym polu elektrostatycznym.....	57
6.3. Przebieg suszenia ziarna pszenicy mieszkanką ozonowo-powietrzną.....	57
6.4. Przebieg suszenia pszenicy w obecności pola elektrycznego i wiatru jonowego.....	60
6.5. Określenie współczynników wymiany ciepła i masy	65

7. OCENA ENERGOCHŁONNOŚCI KONWEKCYJNEJ METODY SUSZENIA ZIARNA ZBÓŻ PRZY WYKORZYSTANIU ENERGII POLA ELEKTROSTATYCZNEGO.....	71
8. PERSPEKTYWY ROZWOJU METOD SUSZENIA ZIARNA ZBÓŻ PRZY WYKORZYSTANIU ENERGII POLA ELEKTROSTATYCZNEGO	75
9. PIŚMIENNICTWO	77
10. SUMMARY	82

1. WPROWADZENIE

Wiedza o zbożu i technologii jego przetwarzania skupia w świecie nauki ogromne rzesze naukowców i praktyków z różnych dziedzin wiedzy. Zboża, które od najdawniejszych wieków osadniczego trybu życia człowieka stanowiły o jego egzystencji są nadal i będą w przyszłości podstawą zaspokajania jego podstawowych potrzeb żywieniowych.

Spośród zbóż, pszenica uznawana jest za najbardziej wartościowe zboże ze względu na jego specyficzne właściwości technologiczne i żywieniowe. Globalna produkcja pszenicy wynosi około jednej trzeciej produkcji zbóż, a blisko 90 % jej plonu stanowi podstawowy pokarm dla ludzi, pokrywając około 20 % dziennego zapotrzebowania na energię, głównie w postaci chleba. Obecnie chleb w codziennej diecie człowieka najbardziej racjonalnie zabezpiecza jego potrzeby żywieniowe. Chleb, uniwersalny produkt zbóż, który jest na całym świecie spożywany przez człowieka, od jego wieku niemowlęcego do późnej starości nie może być zastąpiony w takiej rozciągłości żadnym innym pokarmem. Uzasadnionym stwierdzeniem jest więc określenie tego gatunku jako strategicznego surowca rolniczego, który powinien zajmować priorytetowe znaczenie w polityce gospodarczej każdego kraju produkującego to zboże [23].

Według Międzynarodowej Rady Zbożowej (International Grain Council) [3] zbiory pszenicy w sezonie 1997/98 w świecie osiągną poziom 600 mln ton, a poziom zapasów magazynowych zwiększy się z 99 mln ton w roku 1997 do 108 mln ton w roku 1998. Od 1995 roku wzrastająca konsumpcja pszenicy wywołuje wzrost produkcji. Jednocześnie obserwuje się drastyczne niedobory żywności w krajach Afryki, Ameryki Południowej i znacznych obszarów Azji. Przewiduje się, że do końca XX wieku 90 % przyrostu naturalnego ludności świata nastąpi w krajach rozwijających się, to jest tam, gdzie już obecnie z wyżywieniem ludności są największe problemy.

Niewystarczający poziom produkcji pszenicy dotyczy również Polski. Potrzeby krajowe w zakresie wyżywienia ludności rokrocznie wzrastają. Średnio co 3 lata przybywa w kraju kolejny milion rodaków, a jednocześnie ubywa 100-150 tys. hektarów użytków rolnych pod infrastrukturę miast, dróg i handlu. Szacunkowo przyjmuje się, że do całkowitego zaspokojenia potrzeb żywnościowych na 10 mln mieszkańców potrzeba około 1 mln ton pszenicy. Kraj nasz zamieszkuje około 39 mln ludności, co wskazuje na potrzebę zabezpieczenia pszenicy na poziomie około 4,0 mln ton.

Poszukując sposobów poprawy zaopatrzenia ludności kraju w ten podstawowy surowiec uzasadnione byłoby uwzględnienie problematyki maksymalnego ograniczania strat ilościowych i jakościowych ziarna w procesie jego zbioru, transportu i przechowalnictwa. Straty ilościowe i jakościowe ziarna wynikają głównie z destrukcyjnego oddziaływania sił zewnętrznych, pochodzących od elementów roboczych maszyn, biorących udział w określonym procesie technologicznym jego zbioru i transportu.

W zrozumieniu skali problemu strat ilościowych, jakie mogą pojawić się już na etapie samego transportu ziarna z pola do magazynu jest przykład gospodarki zbożowej na Ukrainie [3]. W roku 1997 produkcja pszenicy osiągnęła w tym kraju poziom 18 mln ton, a straty tego surowca spowodowane tylko transportem osiągnęły poziom 30 %. Ten przykład wskazuje wyraźnie, jak już tylko jeden element całego łańcucha technologicznego zbóż, obejmującego odcinek tak zwanej potocznie drogi "od ziarenka do bochenka", może obniżyć poziom dostępności do tego surowca. Doskonałe warunki klimatyczne tego kraju pozwalają osiągnąć porównywalny poziom produkcji zbóż jak we Francji, a jednocześnie brak odpowiedniego zaplecza technicznego powoduje tak ogromne straty. Ten duży poziom strat obejmuje również etap prymitywnych metod dosuszania ziarna w warunkach naturalnych, najczęściej na powierzchniach utwardzonych odcinków dróg.

Na przełomie XX wieku współczesne rolnictwo, jako dziedzina najbardziej niezbędnej i wytwórczej działalności człowieka, musi się opierać na bazie najnowszych zdobyczy nauki, które stanowią podstawę opracowywania nowych rozwiązań technologicznych lub ulepszania ich dotychczasowych wersji.

Uszkodzenia mechaniczne ziarna, objawiające się w postaci naruszenia naturalnej ciągłości jego tkanek, jak potwierdzają liczne w tym zakresie badania prowadzone również w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie [21], znacznie obniżają jego wartość konsumpcyjną i reprodukcyjną. Skutki uszkodzeń mechanicznych, spowodowanych elementami roboczymi maszyn zbierających i urządzeń transportujących są tym większe im wyższy jest poziom tak zwanych wewnętrznych uszkodzeń mechanicznych bielma w okresie przedzbiorowym. Bezpośrednim zaś powodem powstawania tego typu uszkodzeń wewnętrznych bielma są najczęściej opady deszczu w okresie przedzbiorowym, kiedy ziarno w warunkach polowych osiągnie optymalny poziom wilgotności około 12 - 13 %.

Kolejnym krytycznym odcinkiem łańcucha technologicznego jest zachowanie odpowiedniego sposobu dosuszania wilgotnego ziarna. Straty spowodowane niewłaściwym sposobem dosuszania ziarna mogą osiągać 100%. Ogromne znaczenie dla ograniczenia tych strat ma prawidłowo przeprowadzony proces dosuszania ziarna, szczególnie w latach o niekorzystnych warunkach klimatycznych, charakteryzujących się nadmiernymi opadami deszczu w bezpośrednim okresie przedzbiorowym zbóż, o czym wspomniano wcześniej. W związku z tym zagadnienie doboru odpowiedniego sposobu dosuszania wilgotnego ziarna stanowi przedmiot zainteresowań nie tylko specjalistów z dziedziny technologii zbóż ale i innych dziedzin techniki.

W niniejszej pracy autorzy podjęli próbę opisu zjawiska zachowania się ziarna zbóż w polu elektrycznym i w otoczeniu atmosfery wzbogaconej w ozon. Zakres tego zagadnienia został podyktowany dotychczasowymi rezultatami badań prowadzonych na ziarnie zbóż przez interdyscyplinarny zespół skupiający specjalistów z Wydziału Elektrycznego Politechniki Lubelskiej i Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie.

2. BUDOWA ZIARNIAKA ZBÓŻ

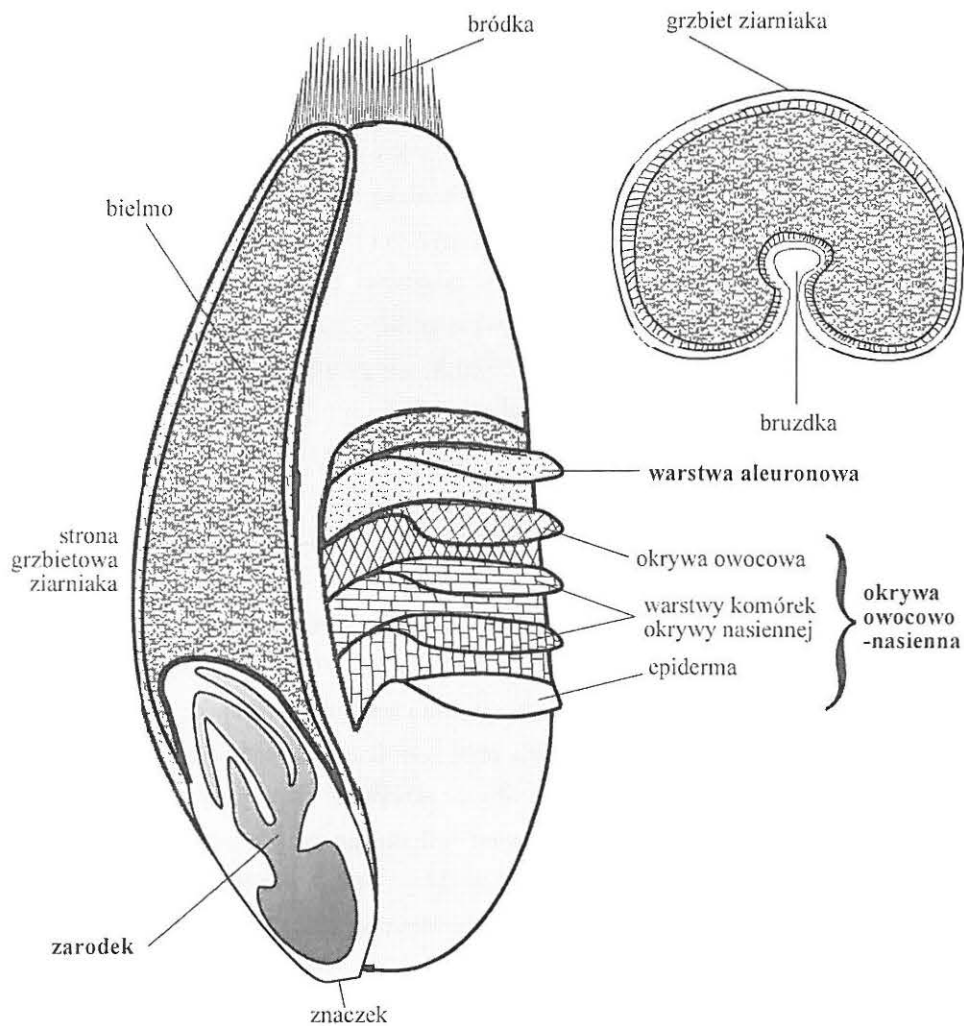
Z biologicznego punktu widzenia, ziarniak jest owocem roślin zbożowych, jednoliściennych. Typowym reprezentantem ziarniaków zbóż jest ziarniak pszenicy zwyczajnej (*Triticum aestivum* L.) i na jego przykładzie omówione będą ważniejsze szczegóły budowy morfologicznej i anatomicznej (zob. rys. 2.1). Pod względem geometrycznym, ziarniaki czterech podstawowych zbóż (pszenicy, żyta, jęczmienia i owsa) stanowią obiekty o kształtach zbliżonych do kształtu elipsoidy, której przekrój poprzeczny jest kardioidą. Kształt ziarniaka praktycznie określa się trzema podstawowymi wymiarami; grubością, szerokością i długością. Przedziały zmienności tych trzech podstawowych wymiarów geometrycznych różnią się dość znacznie w obrębie poszczególnych gatunków zbóż. Przykładowo, w obrębie gatunku pszenicy zwyczajnej ich przeciętne wymiary geometryczne zawierają się w następujących przedziałach: grubość 2,5 - 3,0 mm, szerokość 3,0 - 3,5 mm, długość 6,0 - 6,5 mm. Masa pojedynczego ziarniaka pszenicy mieści się w przedziale od 30 do 40 mg [44, 65].

2.1. Morfologia ziarniaka pszenicy

W budowie morfologicznej ziarniaka pszenicy można wyróżnić jego górną i dolną część. Część górna jest zaokrąglona i u szczytu okryta jednokomórkowymi włoskami, o kształcie sztylactym, tworzącymi tak zwaną bródkę. W dolnej części ziarniaka wyróżniamy zarodek, położony bocznie i skośnie na stronie grzbietowej ziarniaka, jak na rys. 2.1 oraz znaczek - miejsce odłączenia ziarniaka od rośliny macierzystej. Na całej długości ziarniaka można wyróżnić obłą część grzbietową oraz bruzdkę położoną po przeciwnej stronie. Powierzchnia suchego ziarniaka pszenicy po stronie grzbietowej jest najczęściej pofałdowana poprzecznie do osi podłużnej, co łatwo stwierdzić obserwując przez lupę jego powierzchnię już przy 3-krotnym powiększeniu, jak na rys. 2.1.

2.2. Anatomia ziarniaka pszenicy

W budowie anatomicznej ziarniaka pszenicy wyróżniamy 4 zasadnicze części: okrywę owocowo-nasienną, warstwę aleuronową, endosperm i zarodek (rys. 2.1). Procentowy udział tych części w masie ziarniaka jest następujący: okrywa owocowo-nasienna 5-7 %, warstwa aleuronowa 7-9 %, bielmo 83-85% i zarodek 2-3%.



Rys. 2.1. Ważniejsze elementy budowy morfologicznej i anatomicznej ziarniaka pszenicy

Okrywa owocowa nie jest zrosnięta z okrywą nasienną, lecz ściśle do niej przylega, z tego też względu okrywę tę z modelowego punktu widzenia można traktować jako jednolitą warstwę. Warstwę owocową czyli tak zwaną owocnię tworzy przezroczysta, najczęściej jednowarstwowa epiderma o komórkach wydłużonych równoległe do podłużnej osi ziarniaka. W górnej części ziarniaka - jak już wspomnieliśmy wyżej - z wewnętrznej warstwy epidermy wyrastają jednokomórkowe włoski. Jeśli pod warstwą

komórek epidermy występuje warstwa subepidermalna to kształt komórek tej warstwy jest analogiczny jak w epidermie.

Okrywę nasienną tworzą dwie warstwy komórek: pierwsza zbudowana z komórek o kształcie wydłużonym, a druga z komórek o kształcie rurkowatym. Komórki pierwszej warstwy są zorientowane prostopadle do osi ziarniaka, a drugiej - równolegle. Okrywa nasienna ziarniaka pszenicy może charakteryzować się dość dużą zmiennością zabarwienia od słabo-żółtej do czerwonej w zależności od pigmentu znajdującego się w jej komórkach, a cecha ta jest uwarunkowana genetycznie. Okrywa nasienna w części dolnej, grzbietowej - bezpośrednio otacza zarodek, a w pozostałej części ziarniaka - bezpośrednio przylega do warstwy aleuronowej.

W dojrzałym ziarniaku pszenicy poszczególne komórki warstwy owocowo-nasiennej ściśle przylegają do siebie. Okrywa owocowo-nasienna przylega bezpośrednio do warstwy komórek aleuronowych. Ta zróżnicowana orientacja przestrzenna komórek w poszczególnych warstwach okrywy owocowo-nasiennej ma istotne znaczenie dla zachowania odpowiedniej odporności ziarniaka na uszkodzenia mechaniczne.

Zarodek, który znajduje się w dolnej, grzbietowej części jest w ziarniakach pszenicy głęboko osadzony i nie wystaje na zewnątrz konturu linii grzbietowej. Ze względu jednak na dużą hydrofilność tej części ziarniaka przy wzroście wilgotności zarodek wyraźnie wystaje poza tę linię. Niesie to oczywiście określone skutki w postaci uszkodzeń mechanicznych przy zbiorze kombajnowym wilgotnego ziarna pszenicy. W zarodku znajdują się załączki organów przyszłej rośliny. Mogą one, w początkowej fazie swojego rozwoju, korzystać ze związków zapasowych bielma poprzez tarczkę, która bezpośrednio przylega do bielma.

Komórki warstwy aleuronowej, widziane z góry mają kształt nieregularny, falisty a w przekroju są czworokątne. W części grzbietowej ziarniaka występuje niekiedy podwójna warstwa komórek aleuronowych. Ze względu na wysoką koncentrację związków fizjologicznie czynnych, warstwie aleuronowej przypisuje się głównie rolę w rozwoju zarodka. Funkcja ta, według niektórych autorów (cyt. za Stroną [63]), sprowadza się do zapoczątkowania procesu przewodzenia produktów rozkładu skrobi w kierunku rozwijającego się zarodka.

Bielmo właściwe (endosperm) składa się z dużych, cienkościennych komórek, wypełnionych skrobią i białkiem. Twarde ziarniaki pszenicy zwyczajnej o strukturze

szklistej są bardziej preferowane do wypieku chleba i wyrobu makaronów, zaś miękkie - o strukturze mączystej - do wypieku ciast. Interesujące spostrzeżenie na temat struktury endospermu ziarniaka pszenicy poczynili w swoich badaniach Jones [30] i Kent [32]. Autorzy ci na przekrojach poprzecznych ziarniaków pszenicy stwierdzili obecność komórek o dominującym kształcie pryzmatycznym, wydłużonym, o orientacji prostopadłej do osi wzdłużnej ziarniaka. Komórki tego kształtu występują głównie w części grzbietowej ziarniaków. Komórki znajdujące się w głębi, w środkowej części obu fałd ziarniaka są mniej regularne. Temu zróżnicowaniu w kształcie komórek endospermu, można przypisać zmienność przemieszczania się wody w procesie nawilżania i suszenia ziarna. Prawdopodobnie zróżnicowanie prędkości przemieszczania się wody w ziarniakach dojrzałych, w warunkach polowych, stanowi przyczynę powstawania krytycznych naprężeń wewnętrznych, po przekroczeniu których powstają charakterystyczne pęknięcia poprzeczne w obrębie zarówno obu fałd jak i części grzbietowej ziarniaka. Zjawisko destrukcyjnego oddziaływania wysokiego gradientu wilgotności na suche ziarno zostało dość dobrze poznane dzięki metodzie detekcji rentgenograficznej stosowanej w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie [20].

Ziarna skrobi wypełniające komórki endospermu stanowią około 66-68 % całkowitej objętości ziarniaka [44]. Według Brocklehursta i Eversa [11] liczba ziaren skrobi w endospermie ziarniaka pszenicy odmiany Marris Huntsman wahała się w zależności od kształtu i rozmiaru ziarniaka w przedziale 398-594 milionów. W składzie granulometrycznym ziarn skrobi wyróżnia się dwie charakterystyczne frakcje wymiarowe: frakcję typu A o średnicy ziarenek powyżej 10 μm i frakcję typu B o średnicy poniżej 10 μm . W badaniach tych stwierdzono, że udział ziarna skrobi o średnicy poniżej 10 μm (typ B) był istotnie wyższy w ziarniakach dorodnych (większych) o kształcie regularnym w porównaniu z ziarniakami małymi o kształcie nieregularnym. Badania dotyczące składu granulometrycznego skrobi, przeprowadzone na 12 odmianach pszenicy [16] wykazały, że ziarna skrobi typu A (większe) nie przekraczają 3 % całkowitej ilości skrobi w pojedynczym ziarniaku.

Ziarna skrobi pszenicy są najczęściej kształtu kulistego, rzadziej elipsoidalnego, mniej lub bardziej nieregularne. Najmniejsze ziarna skrobi o średnicy około 1 μm posiadają kształt kulisty, największe zaś o średnicy około 40 μm są zwykle kształtu nieregularnego. Ciężar właściwy skrobi mieści się w przedziale 1,48-1,61 g/cm^3 i jest

największy w porównaniu z pozostałymi składnikami endospermu. O ciężarze właściwym ziarniaka jako całości decyduje przede wszystkim zawartość skrobi.

Kolejnym głównym składnikiem komórek endospermu jest białko. W poszczególnych częściach ziarniaka objętościowa zawartość białka jest następująca: okrywa owo-cowo-nasienna około 5%, warstwa aleuronowa około 13-20%, endosperm około 65-75% oraz zarodek 6-20%. W przeliczeniu na suchą masę, udział białka wynosi odpowiednio: 30-50% w warstwie aleuronowej, 11-12% w endospermie i 20-35% w zarodku. W endospermie najwięcej białka występuje w obszarze bezpośrednio przylegającym do warstwy aleuronowej, a w kierunku ku środkowi endospermu zawartość białka maleje. Rozmieszczenie przestrzenne białka i skrobi w ziarnie pszenicy jest bardzo zróżnicowane. Wolne przestrzenie pomiędzy ziarnami skrobi a otaczającym białkiem, obserwowane przy powiększeniu około 5000, są charakterystyczne dla struktur typu mączystego, które, jak wynika z obserwacji, tworzą efekt bieli na skutek rozpraszania światła przez drobne przestrzenie powietrzne. Ziarniaki typu mączystego są uboższe w białko w porównaniu z ziarniakami typu szklistego. W praktyce dość łatwo można dokonać selekcji w ziarnie pszenicy pod względem typu struktury endospermu poprzez ocenę wizualną, co pozwala uzyskać jednocześnie podział testowanej próbki na dwie frakcje o istotnie zróżnicowanej średniej zawartości białka. Wizualna selekcja, aczkolwiek subiektywna, pozwala przewidzieć niektóre właściwości fizyczne, takie jak wytrzymałość ziarna na zgniatanie [27, 35], dynamikę nawilżania [71] lub wymianę gazową [4]. Selekcja taka nie pozwala jednak na dokładniejsze określenie struktury endospermu, rozumianej jako przestrzenne rozmieszczenie białka i skrobi w poszczególnych komórkach. Badania struktury wewnętrznej ziarna pszenicy, przeprowadzone metodą porozymetrii rtęciowej, wskazują również na odmienny rozkład porów wewnętrznych w obrębie pszenicy ozimej i jarej. Rozkład porów wewnętrznych wynika prawdopodobnie nie tylko ze zróżnicowania składu granulometrycznego skrobi, ale i białka. Kompleks białkowy wypełniający przestrzenie w obrębie komórek endospermu składa się z globul białkowych, których rozmiary mieszczą się w przedziale od 1 do 60 μm [44].

Z najnowszych badań Greenwella i Schofielda [22] wynika, że białko odgrywa istotną rolę w nadawaniu miękkości endospermu pszenicy. Chociaż białko otacza powierzchnię ziarn skrobi to przylega do nich z różną siłą. Jak stwierdzają wyżej cytowani autorzy, mechanizm związania białka ze skrobią nie jest jeszcze dokładnie poznany. W ziarniakach

pszenicy, szczeliny i pęknięcia powstające w procesie destrukcyjnego oddziaływania sił zewnętrznych wykazują tendencję do przechodzenia wzdłuż ścian komórkowych, ale zdarzają się również przypadki pęknięć poprzecznych komórek endospermu. W takich przypadkach, w ziarniakach typu szklanego, znacznie wzrasta udział popękanych ziarn skrobi. Natomiast, w ziarniakach typu mączystego, na powierzchniach przełomów komórek można zaobserwować całe ziarna skrobi, które na skutek mniejszej adhezji łatwiej oddzielają się od matrycy białkowej.

Złożoność struktury wewnętrznej ziarniaka oraz jego odporność na destrukcyjne działanie czynników fizycznych, takich jak obciążenia mechaniczne (pochodzące od sił zewnętrznych) czy określony gradient temperatury i wilgotności (powodujący wzrost naprężeń wewnętrznych w endospermie ziarniaka) - nie są dotychczas dokładnie poznane.

Na obecnym etapie wiedzy nie można przewidzieć jak wpływa typ struktury ziarna (szklistość lub mączystość bielma) na jego zachowanie się w polu elektrycznym. Zagadnienie to będzie również przedmiotem analizy w niniejszym opracowaniu.

3. WPLYW POLA ELEKTRYCZNEGO I NAPRĘŻEŃ MECHANICZNYCH NA WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNE ZIARNIAKA

Elektryczne właściwości ziarniaków są ważne z wielu powodów:

- czynią one możliwym pośrednie określenie ich wilgotności, w związku z wysoką korelacją między przenikalnością elektryczną i wilgotnością,
- pozwalają na automatyzację pomiarów wilgotności w procesie suszenia, a więc uniknięcie „przesuszenia” ziarniaków i optymalizację zużycia energii,
- przenikalność i stratność elektryczna ziarniaków są głównymi parametrami określającymi pochłanianie energii w procesie grzania dielektrycznego.

3.1. Zależność rezystancji ziarniaka zbóż od naprężeń mechanicznych

Przeprowadzone badania miały na celu określenie korelacji między wartością naprężeń mechanicznych, a wartością rezystancji ziarniaka. Naprężenia w ziarniaku wywoływano zewnętrzną siłą ściskającą lub rozciągającą. Do pomiarów zostały opracowane i wykorzystane specjalne uchwyty mocujące, pozwalające na poddawanie ziarniaków oddziaływaniu zewnętrznej siły rozciągającej lub ściskającej. Odpowiednią trwałość umocowania i możliwość elektrycznych połączeń uzyskano stosując klej przewodzący. Do wytwarzania określonych naprężeń mechanicznych wykonano prototypową maszynę wytrzymałościową - mikrozrywarę (rys. 3.1) [1].

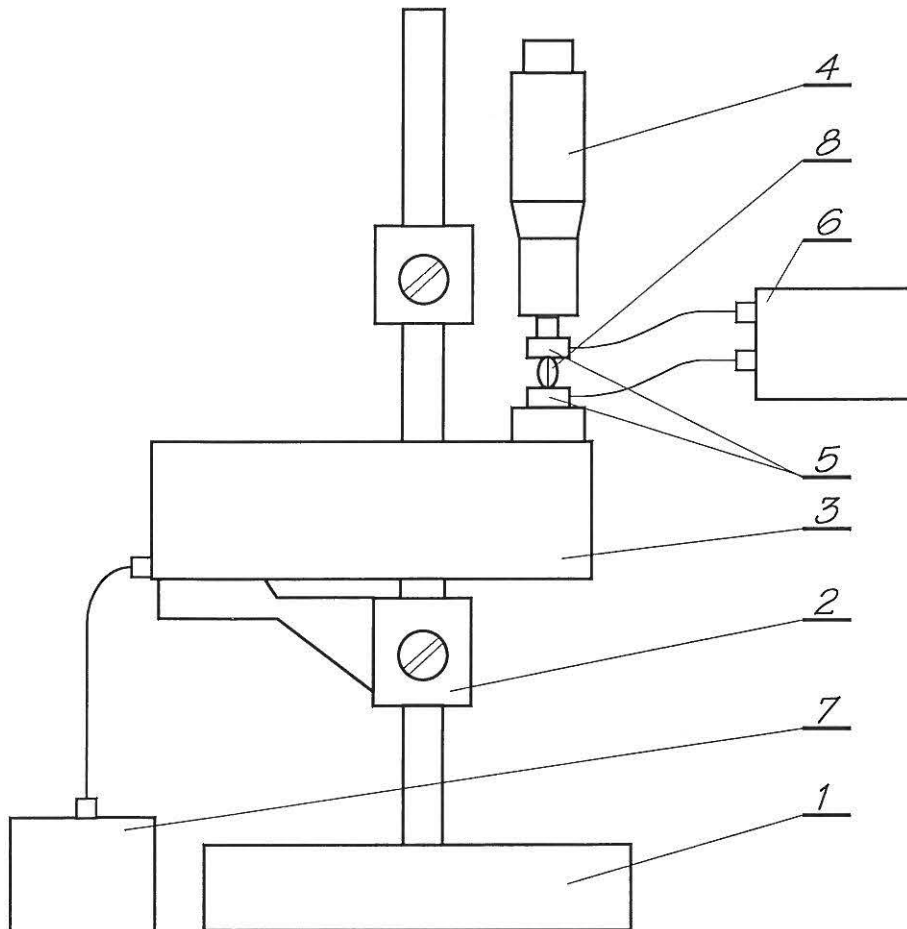
Do badań wykorzystano ziarna pszenicy jarej SIGMA o wymiarach: długość $c \approx 5$ mm, średnica $d \approx 2,8$ mm, współczynnik sferyczności $B_v = d/c \approx 0,56$. Ziarniaki te charakteryzują się wysoką twardością struktury. Przy tego typu budowie ziarniaka można obserwować zjawiska strykcyjne.

Na podstawie wyników badań rezystancji ziarniaka poddanego działaniu sił rozciągających oraz ściskających stwierdzono (rys. 3.2 i 3.3 oraz tab. 3.1 i 3.2):

- Wartość rezystancji ziarniaka zależy od sił rozciągających.
- W początkowej fazie rozciągania $F=0 \div 6$ N rezystancja nie zmienia swojej wartości.
- Przy wyższych wartościach sił rozciągających $F > 6$ N wartość rezystancji rośnie ze wzrostem siły (tab. 3.1). Wzrost rezystancji ma w przybliżeniu przebieg hiperboliczny.
- Maksymalny przyrost rezystancji odniesiony do wartości początkowej wynosi $30 \div 50$ %.

- Wartość rezystancji maleje ze wzrostem siły ściskającej w przybliżeniu hiperbolicznie.

- Największe zmiany obserwuje się w początkowej fazie ściskania: 60-cio procentowemu przyrostowi siły odpowiada 16-to procentowy przyrost rezystancji (tab.3.2). W ostatniej fazie ściskania $40 \text{ N} < F < 60 \text{ N}$ przyrost rezystancji ziarniaka jest niewielki i wynosi 4 %.



Rys. 3.1. Stanowisko badawcze: 1 - konstrukcja nośna, 2 - uchwyt przetwornika siły, 3 - przetwornik siły, 4 - urządzenie dociskowe, 5 - elektrody z wklejonym ziarniakiem, 6 - układ pomiaru rezystancji, 7 - układ pomiaru siły, 8 – ziarniak [1]

Tab. 3.1. Wyniki pomiaru rezystancji ziarniaka w funkcji siły rozciągającej, $w_{\%} = 14 \%$, $T = 293 \text{ K}$

Lp.	Siła rozciągająca		$R_{\dot{s}r}$	δ_n	$R_{\dot{s}r}/R_{\dot{s}r}^*$
	F	F/F^*			
	N	-			
1.	0	0,00	0,28	0,23	0,44
2.	2	0,14	0,30	0,24	0,46
3.	4	0,29	0,32	0,25	0,49
4.	6	0,43	0,36	0,08	0,55
5.	8	0,57	0,38	0,08	0,58
6.	10	0,71	0,40	0,08	0,61
7.	11	0,79	0,40	0,08	0,61
8.	12	0,86	0,44	0,08	0,67
9.	13	0,93	0,50	0,10	0,83
10.	14	1,00	0,65	0,10	1,00
11.	15*	*	*	*	*

gdzie: F - wartość siły rozciągającej (ściskającej),

F^* - wartość siły rozciągającej (ściskającej), przy której wszystkie próbki w serii uległy zniszczeniu,

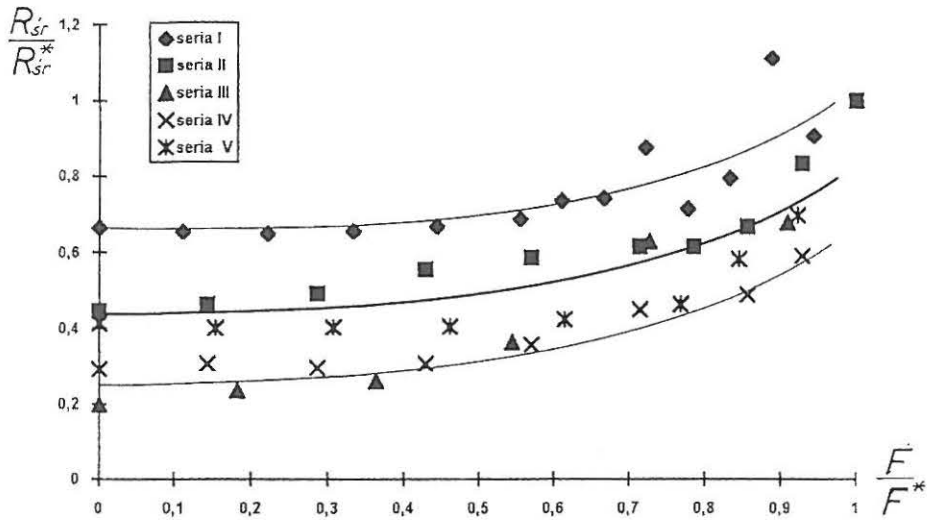
$R_{\dot{s}r}$ - wartość średnia rezystancji ziarniaka dla danej serii pomiarów,

$R_{\dot{s}r}^*$ - wartość rezystancji ziarniaka uzyskana tuż przed zniszczeniem próbek,

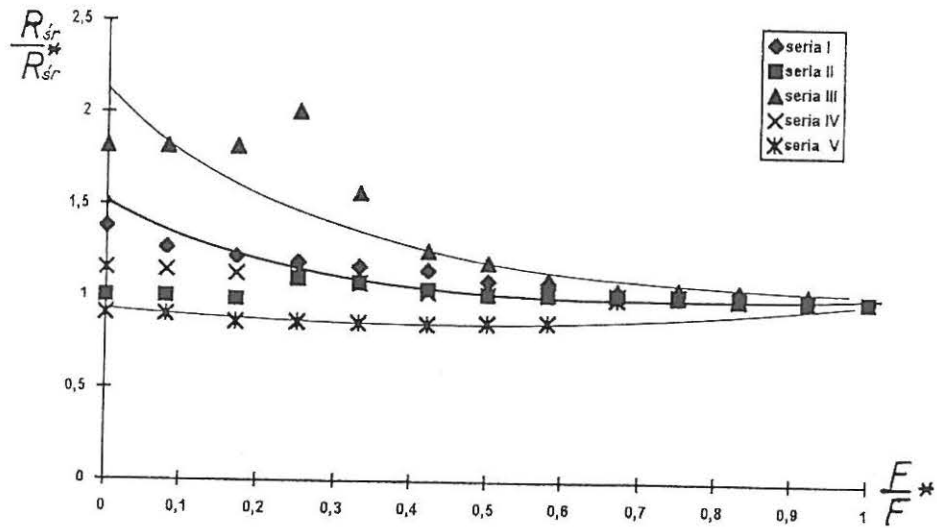
δ_n - odchylenie standardowe dla danej serii pomiarów.

Tab. 3.2. Wyniki pomiaru rezystancji ziarniaka w funkcji siły ściskającej, $w_{\%} = 14 \%$, $T = 293 \text{ K}$

Lp.	Siła ściskająca		$R_{\dot{s}r}$	δ_n	$R_{\dot{s}r}/R_{\dot{s}r}^*$
	F	F/F^*			
	N	-			
1.	0	0,00	0,39	0,2	0,91
2.	5	0,08	0,39	0,2	0,93
3.	10	0,17	0,40	0,1	0,96
4.	15	0,25	0,30	0,1	0,72
5.	20	0,33	0,31	0,1	0,73
6.	25	0,42	0,31	0,1	0,74
7.	30	0,50	0,32	0,1	0,76
8.	35	0,58	0,32	0,1	0,77
9.	40	0,67	0,34	0,1	0,80
10.	45	0,75	0,34	0,1	0,81
11.	50	0,83	0,36	0,1	0,84
12.	55	0,92	0,41	0,1	0,97
13.	60*	1,00	0,42	0,1	1,00



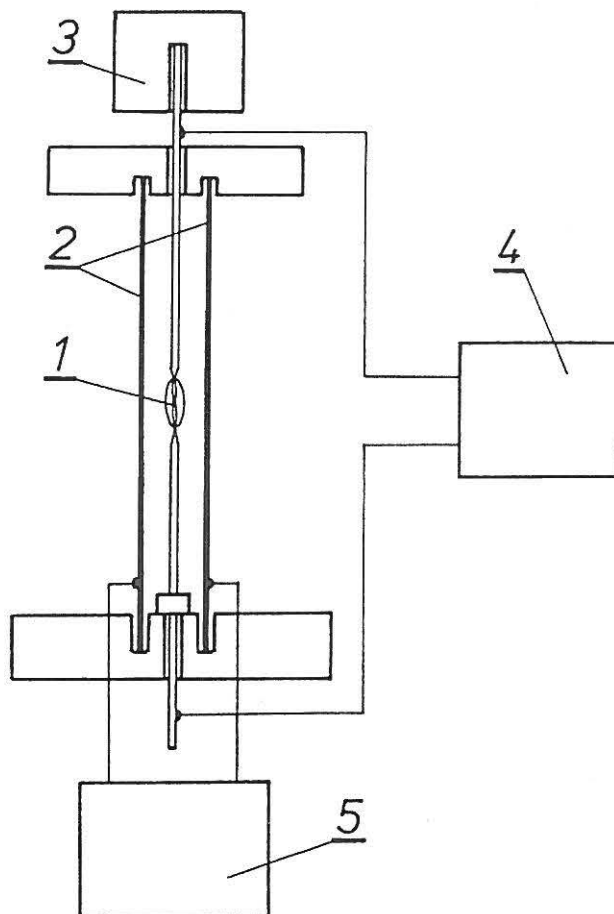
Rys. 3.2. Zależność rezystancji ziarniaka w funkcji siły rozciągającej: R_{sr}^* – wartość rezystancji ziarniaka uzyskana tuż przed zniszczeniem próbki, F^* – wartość siły, przy której wszystkie próbki w serii uległy zniszczeniu [1]



Rys. 3.3. Zależność rezystancji ziarniaka w funkcji siły ściskającej [1]

3.2. Zależność rezystancji ziarniaka zbóż od natężenia pola elektrostatycznego

Do określania zależności rezystancji ziarniaków zbóż od natężenia pola elektrostatycznego zaprojektowano specjalne stanowisko pomiarowe (rys. 3.4).



Rys. 3.4. Schemat układu do pomiaru rezystancji ziarniaka w polu elektrostatycznym: 1 – ziarniak, 2 - okładki kondensatora płaskiego, 3 – ciężarek dociskowy, 4- miernik rezystancji, 5 – zasilacz wysokiego napięcia prądu stałego [1]

Wewnątrz kondensatora pomiarowego umieszczany był ziarniak (1) z elektrodami drutowymi umożliwiającymi pomiar rezystancji przy wykorzystaniu miernika rezystancji. Elektrody były przyklejane do ziarniaka przy pomocy kleju z 30 % domieszką grafitu.

Na podstawie wyników badań rezystancji ziarniaka w funkcji natężenia pola elektrostatycznego stwierdzono (rys. 3.5, tab. 3.3):

- wartość rezystancji ziarniaka zależy od natężenia pola elektrostatycznego,
- wpływ pola elektrostatycznego jest większy dla ziarniaków o mniejszej wilgotności ($w_{g\%} \leq 11,4\%$),
- przy wzroście natężenia pola elektrostatycznego rezystancja ziarniaka zmniejsza się,
- zmiana rezystancji ma w przybliżeniu charakter liniowy; największa zmiana rezystancji przy wzroście natężenia od 0 do 500 kV/m wynosiła ok. 5,5 %.

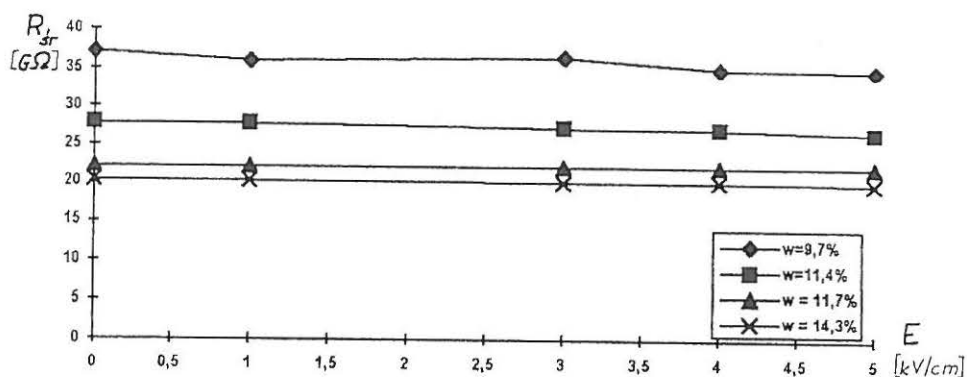
Tab. 3.3. Wyniki pomiaru rezystancji ziarniaka w funkcji natężenia pola elektrostatycznego, $T=293\text{ K}$

$w_{g\%}$	$R_{\bar{s}r}$	δ_n	$R_{\bar{s}r}$	δ_n	$R_{\bar{s}r}$	δ_n	$R_{\bar{s}r}$	δ_n	$R_{\bar{s}r}$	δ_n
	GΩ	-	GΩ	-	GΩ	-	GΩ	-	GΩ	-
9,7	37,20	17,19	36,00	14,10	36,50	15,06	35,70	14,03	34,90	13,01
11,4	27,90	7,17	27,80	7,24	27,20	7,55	27,10	7,61	26,60	6,65
11,7	22,15	7,14	22,13	7,17	22,11	7,18	22,09	7,20	22,09	7,20
14,3	20,37	14,51	20,20	14,13	20,00	13,79	20,01	13,79	19,90	15,67

gdzie: $R_{\bar{s}r}$ - wartość średnia rezystancji ziarniaka dla danej wartości natężenia pola,

δ_n - odchylenie standardowe dla danej próby,

$w_{g\%}$ - wilgotność ziarniaka.

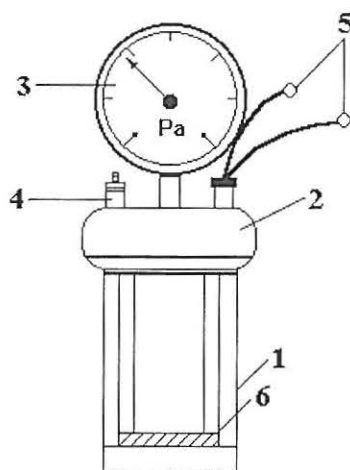


Rys. 3.5. Zależność rezystancji ziarniaka od natężenia pola elektrostatycznego (ziarniak mocowany za pomocą przyklejanych elektrod drutowych) [1]

3.3. Przenikalność elektryczna ziarniaków zbóż w funkcji naprężeń mechanicznych

Do badań wykorzystano ziarna jęczmienia o średnich wymiarach: długość $c \approx 8,2$ mm, średnica $d \approx 3,1$ mm, współczynnik sferyczności $B_w = d/c \approx 0,38$, ziarna pszenicy jarej o wymiarach: długość $c \approx 5$ mm, średnica $d \approx 2,8$ mm, współczynnik sferyczności $B_w = d/c \approx 0,6$, ziarna żyta o średnich wymiarach: długość $c \approx 7,3$ mm, średnica $d \approx 2,7$ mm, współczynnik sferyczności $B_w = d/c \approx 0,37$ [29].

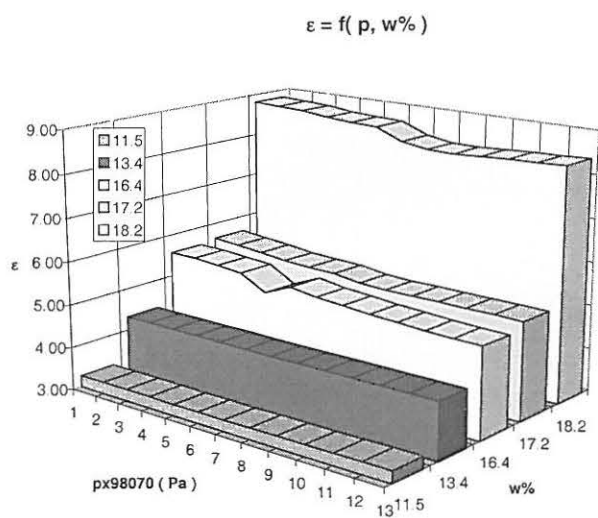
Do wytwarzania określonych naprężeń mechanicznych wykonano zbiornik ciśnieniowy, wewnątrz którego umieszczano kondensator cylindryczny. W kondensatorze umieszczano badane ziarno. Naprężenia mechaniczne działające na ziarniaki wywoływano sprężonym powietrzem. Wartość zewnętrznej siły mechanicznej regulowano reduktorem ciśnienia powietrza podawanego ze sprężarki. Widok zbiornika ciśnieniowego i sposób umieszczenia w nim kondensatora pomiarowego przedstawiono na rys. 3.6.



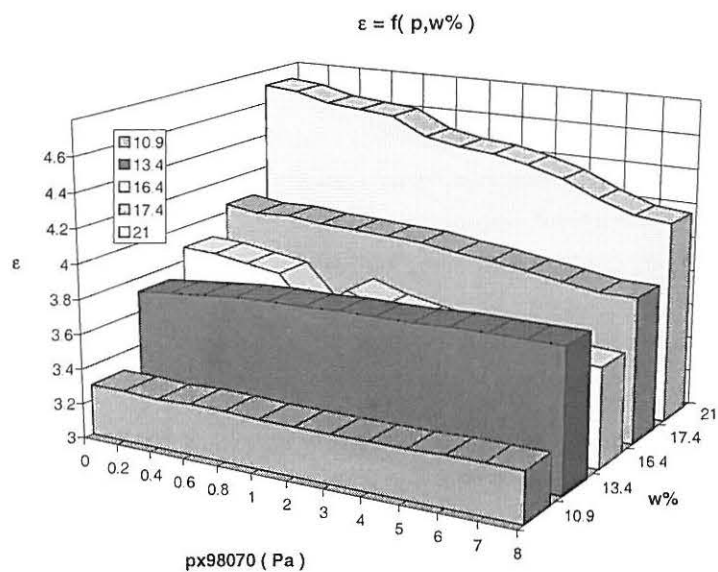
Rys. 3.6. Widok zbiornika ciśnieniowego z kondensatorem pomiarowym: 1 - stalowy cylinder, 2 - pokrywa, 3 - manometr, 4 - zawór, 5 - przewody kondensatora pomiarowego, 6 - kondensator pomiarowy

Do pomiaru przenikalności elektrycznej wykorzystywano automatyczny mostek RLC.

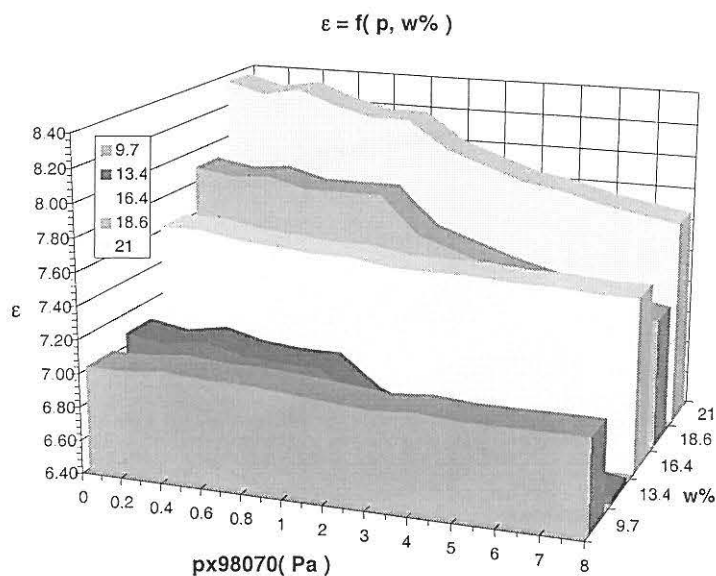
Na rys. 3.7 ÷ 3.9 przedstawiono zbiorcze histogramy zależności $\epsilon = f(p, w\%)$ dla ziarniaków: jęczmienia, pszenicy i żyta.



Rys. 3.7. Zależność przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia od ciśnienia przy $w_{\%} = \text{const.}$



Rys. 3.8. Zależność przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy od ciśnienia przy $w_{\%} = \text{const.}$



Rys. 3.9. Zależność przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta od ciśnienia przy $w_{\%} = \text{const}$.

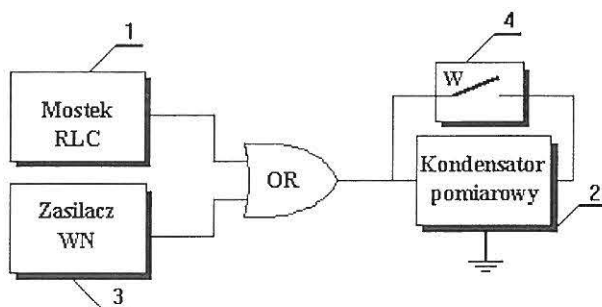
Na podstawie wyników badań przenikalności elektrycznej ziarniaków poddanych działaniu naprężeń mechanicznych stwierdzono, że:

- wartość przenikalności elektrycznej ziarniaka zależy od naprężeń mechanicznych;
- wielkość zmiany przenikalności elektrycznej ziarniaków w funkcji naprężeń mechanicznych zależy od ich wilgotności;
- przy wzroście ciśnienia przenikalność elektryczna ziarniaków maleje (tym silniej im większa była ich wilgotność);
- przy ściskaniu ziarniaków otrzymano zmniejszenie średniej przenikalności elektrycznej:

- dla ziarniaków jęczmienia o wilgotności $w_{\%} = 16,4 \%$, $\Delta\varepsilon = 8,6 \%$;
- dla ziarniaków pszenicy o wilgotności $w_{\%} = 16,4 \%$, $\Delta\varepsilon = 8,0 \%$;
- dla ziarniaków żyta o wilgotności $w_{\%} = 16,4 \%$, $\Delta\varepsilon = 1,9 \%$;
- zmiany te mają w przybliżeniu charakter hiperboliczny.

3.4. Zależność przenikalności elektrycznej ziarniaków zbóż od natężenia pola elektrostatycznego

W celu określenia wpływu natężenia pola elektrostatycznego na przenikalność elektryczną ziarniaków zbóż skonstruowano i zbudowano stanowisko badawcze (rys. 3.10). Biologiczny charakter nasion sprawia, że charakteryzują się one ogromną zmiennością cech fizycznych i biologicznych, co utrudnia uzyskanie powtarzalnych wyników. Opracowane metodyki pomiarów zapewniające precyzyjne ustawienie wilgotności oraz selekcja ziarniaków na sitach selekcyjnych i eliminacja ziarniaków uszkodzonych pozwoliły na uzyskanie powtarzalnych wyników. Uzyskane wyniki pozwalają również na pośrednie określenie charakteru sił strykcyjnych powstających w ziarniakach.



Rys. 3.10. Schemat układu do pomiaru przenikalności elektrycznej ziarniaków zbóż w polu elektrostatycznym: 1 - mostek RLC, 2 - kondensator pomiarowy (płaski), 3 - zasilacz wysokiego napięcia WN prądu stałego, 4 - wyłącznik W, OR - przełączane naprzemiennie

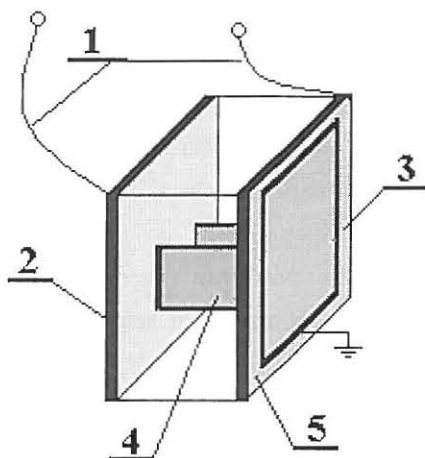
Do wytwarzania pola elektrostatycznego zaprojektowano i wykonano komorę pomiarową - kondensator płaski (rys. 3.11), wewnątrz którego umieszczano badany dielektryk (ziarniak zbóż).

Przenikalność elektryczną ziarniaków wyznaczano metodą pośrednią poprzez pomiar pojemności kondensatora pustego oraz wypełnionego badanymi ziarniakami (równanie 3.1):

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}, \quad (3.1)$$

gdzie: C - pojemność kondensatora z ziarniakami zbóż, F;

C_0 - pojemność pustego kondensatora, F.



Rys. 3.11. Widok kondensatora płaskiego: 1 - przewody kondensatora pomiarowego, 2,3 - okładki kondensatora pomiarowego, 4 - komora na ziarniaki zbóż, 5 - ekran

W celu określenia związku między wpływem pola elektrostatycznego na przenikalność ziarniaków jednego gatunku w powiązaniu z wpływem na inny gatunek, (np. jęczmień - pszenica), posłużono się współczynnikiem korelacji.

Równanie współczynnika korelacji jest następujące:

$$\rho_{x,y} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (3.2)$$

gdzie: $-1 \leq \rho_{x,y} \leq 1$.

Równanie współczynnika kowariancji ma kształt:

$$Cov(X,Y) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \mu_x)(y_j - \mu_y), \quad (3.3)$$

gdzie: $Cov(X,Y)$ - kowariancja (tzn. średnia z iloczynów odchyłek każdej pary punktu danych. Umożliwia ona określenie zależności pomiędzy dwoma zbiorami danych),

x_j, y_j - j-ty element odpowiednio porównywanych zbiorów danych X i Y ,

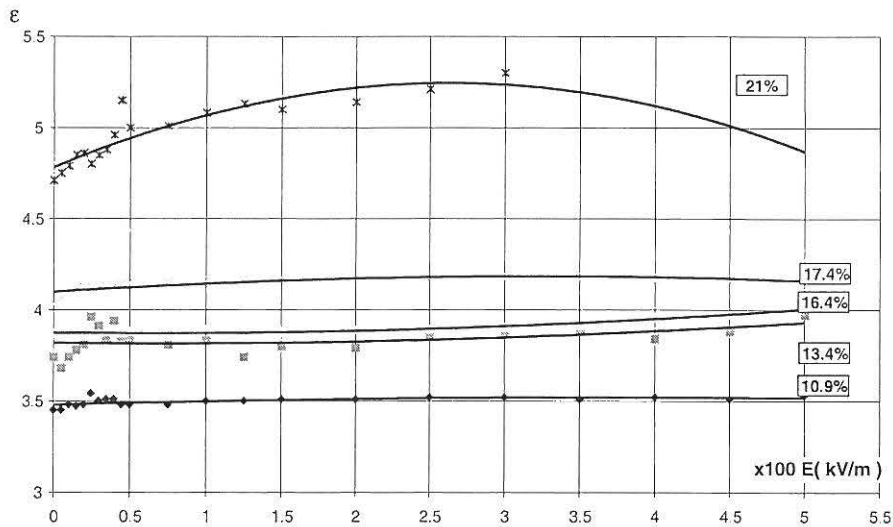
μ_x, μ_y - odpowiednio średnie danych zbioru X i Y ,

σ_x, σ_y - odchylenia standardowe odpowiednio danych zbioru X i Y ,

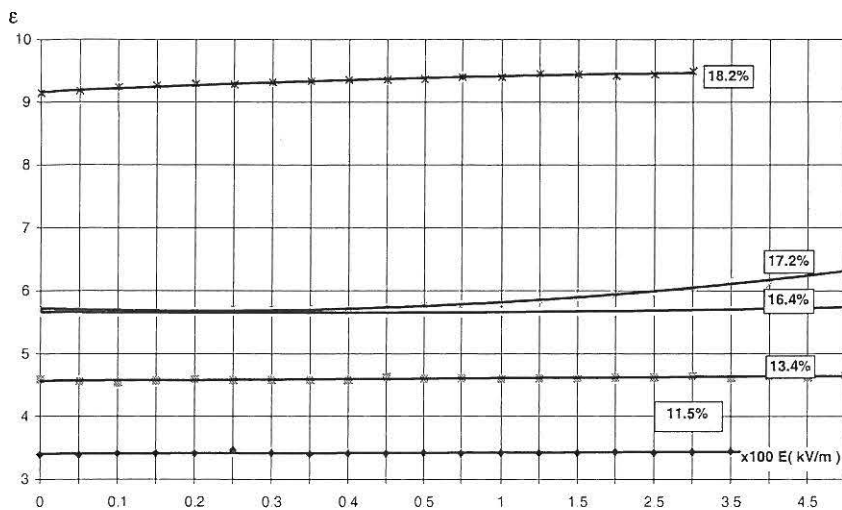
n - liczba elementów porównywanych zbiorów X i Y .

Dodatnie wartości współczynnika korelacji ρ wskazują, że wzrostowi (spadkowi) pod wpływem natężenia pola elektrostatycznego dla jednego gatunku nasion towarzyszy wzrost (spadek) pod wpływem tego samego rodzaju wymuszenia dla drugiego gatunku. Dowodzi to silnego związania tych zależności (tym silniejsze im jego wartość jest bliższa 1). W przypadku, gdy dużym przyrostom przenikalności elektrycznej jednego gatunku nasion towarzyszą przeciwnego znaku przyrosty drugiego gatunku występuje między nimi korelacja ujemna (wartości współczynnika korelacji bliskie - 1). Bliskie zeru wartości tego współczynnika wskazują, że są one nie związane.

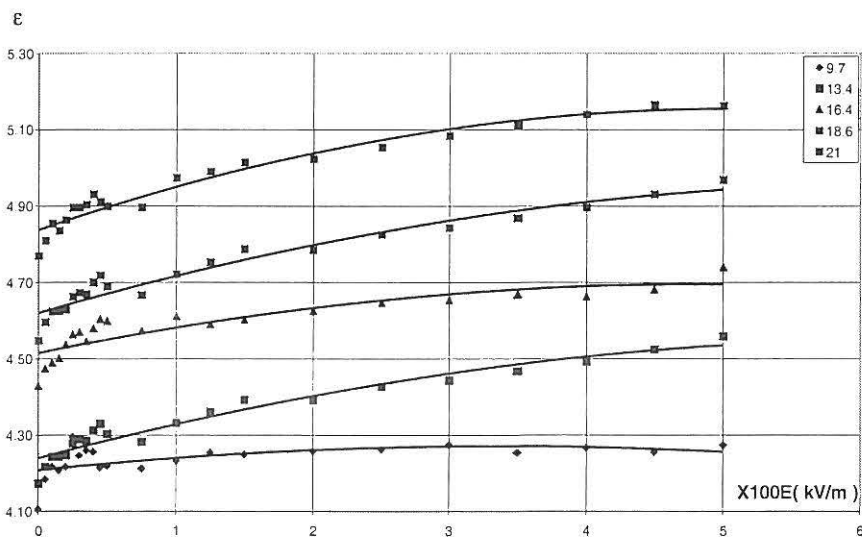
Na rys. 3.12 ÷ 3.14 przedstawiono wykresy zależności $\varepsilon = f(E, w_H)$ dla ziarniaków: jęczmienia, pszenicy i żyta. Wykres zależności współczynnika korelacji ρ dla ziarniaków jęczmienia i pszenicy w funkcji natężenia pola elektrostatycznego i wilgotności przedstawia rys. 3.15.



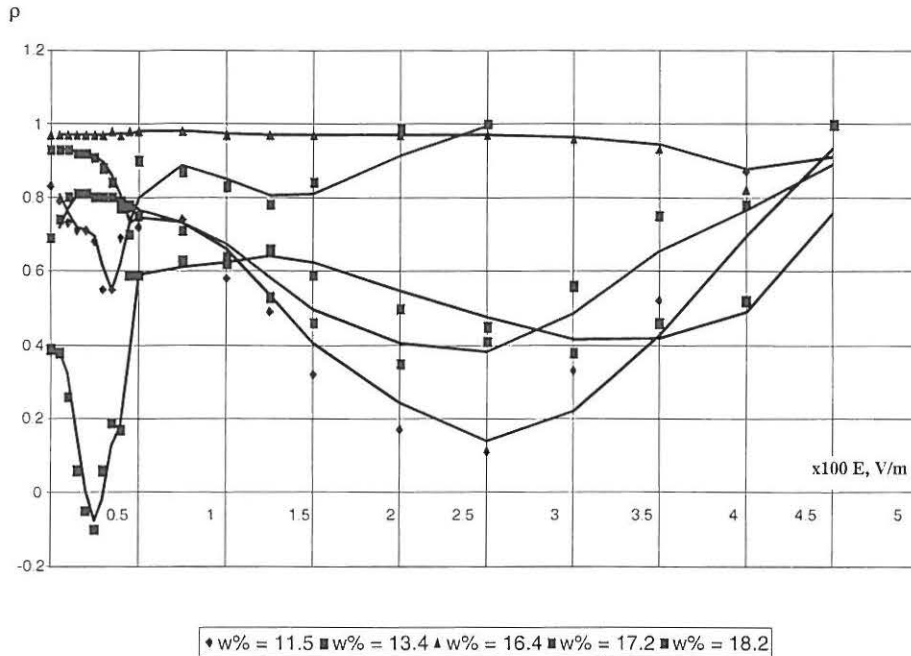
Rys. 3.12. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy w funkcji natężenia pola elektrostatycznego: $w_H = \text{const}$.



Rys. 3.13. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia w funkcji natężenia pola elektrostatycznego: $w_{zi} = \text{const}$.



Rys. 3.14. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków zryta w funkcji natężenia pola elektrostatycznego: $w_{zi} = \text{const}$.



Rys. 3.15. Wykres zależności współczynnika korelacji między wpływem natężenia pola elektrostatycznego na przenikalność elektryczną ziarniaków jęczmienia i pszenicy: $w_{i\%} = \text{const}$.

W wyniku badań przenikalności elektrycznej ziarniaków (dielektryków niejednorodnych) w funkcji natężenia pola elektrostatycznego stwierdzono, że:

- wartość przenikalności elektrycznej ziarniaków zależy od natężenia pola elektrostatycznego;
- wpływ pola elektrostatycznego jest większy dla ziarniaków o większej wilgotności ($w_{i\%} > 16\%$);
- przy wzroście natężenia pola elektrostatycznego w granicach 0÷500 kV/m przenikalność elektryczna ziarniaków rośnie:
 - dla jęczmienia o wilgotności $w_{i\%} = 17,2\%$, $\Delta\epsilon = 11,7\%$;
 - dla pszenicy o wilgotności $w_{i\%} = 21\%$, $\Delta\epsilon = 12,4\%$;
 - dla żyta o wilgotności $w_{i\%} = 13,4\%$, $\Delta\epsilon = 9,3\%$.

- na podstawie wyników obliczeń współczynnika korelacji, wiążących zmiany przenikalności elektrycznej wywołane polem elektrostatycznym z gatunkami zbóż stwierdzono silne dodatnie związanie ziarniaków jęczmienia i pszenicy o wilgotności $w_{iz} = 18,2\%$ (w przedziale zmian natężenia pola $\langle 0 \div 0,35 \rangle$ kV/m) oraz o wilgotności $w_{iz} = 16,4\%$ (w całym zakresie zmian natężenia pola elektrostatycznego).

4. WYKORZYSTANIE ELEKTRYCZNYCH WŁAŚCIWOŚCI ZIARNIAKÓW ZBÓŻ WE WSPÓŁCZESNYCH TECHNOLOGIACH SUSZENIA

Przeprowadzone w ostatnich latach przez wielu autorów badania wskazały na potencjalne możliwości zastosowania pól elektromagnetycznych o częstotliwościach radiowych 1 ÷ 100 MHz (RF) oraz mikrofalowych (powyżej 500 MHz), w przetwórstwie rolniczym. Potencjalne zastosowanie tych pól to [2, 12, 19, 31, 34, 38, 47, 48, 51, 67]:

- pomiar wilgotności,
- suszenie,
- selekcja nasion,
- czyszczenie nasion,
- niszczenie insektów,
- przedsiewna elektroobróbka nasion.

W przypadku oddziaływaniu pól elektrycznych na nasiona zbóż, istotne są ich właściwości dielektryczne. Najczęściej przedmiotem zainteresowania są następujące właściwości dielektryczne materiału:

- stała dielektryczna ϵ ,
- współczynnik stratności elektrycznej $\text{tg}\delta$,
- kąt strat dielektrycznych δ ,
- konduktywność skrośna σ i powierzchniowa σ_p .

Konduktywność skrośna σ jest miarą zdolności środowiska do skrośnego przewodzenia prądu elektrycznego, zaś konduktywność powierzchniowa σ_p jest miarą zdolności do przewodzenia prądu w cienkiej przypowierzchniowej warstwie dielektryka.

Współczynnik stratności elektrycznej $\text{tg}\delta$ jest miarą strat energii elektrycznej wydzielanej w dielektryku w postaci ciepła. Charakteryzuje on straty energii w dielektrykach poddanych działaniu sinusoidalnie zmiennego pola elektrycznego.

Właściwości te określane są przy pomocy zależności [31, 43, 59]:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = |\epsilon|e^{-j\delta}, \quad (4.1)$$

$$\text{tg}\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}, \quad (4.2)$$

gdzie: ε - zespolona względna stała dielektryczna lub zespolona względna przenikalność elektryczna,

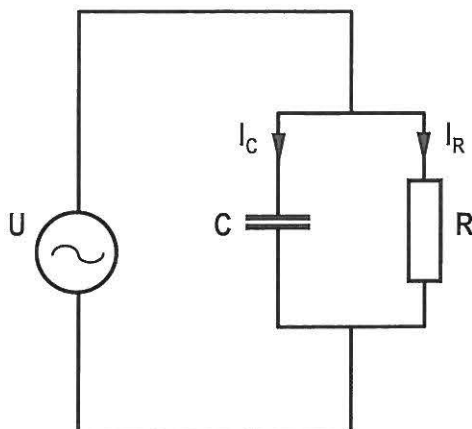
ε' - względna stała dielektryczna lub względna przenikalność elektryczna (część rzeczywista zespolonej względnej stałej dielektrycznej),

ε'' - część urojona zespolonej względnej stałej dielektrycznej,

$\operatorname{tg}\delta$ - współczynnik stratności elektrycznej,

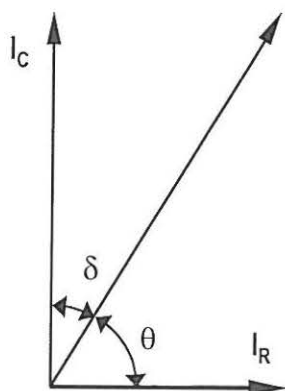
δ - kąt strat dielektrycznych.

Dla określonej częstotliwości dielektryk może być przedstawiony w obwodzie elektrycznym w postaci idealnej pojemności i rezystancji, rys. 4.1. Wykres wektorowy (wskazowy) napięcia i prądów dla zastępczego równoległego obwodu RC zasilanego napięciem przemiennym jest przedstawiony na rys. 4.2 [47].

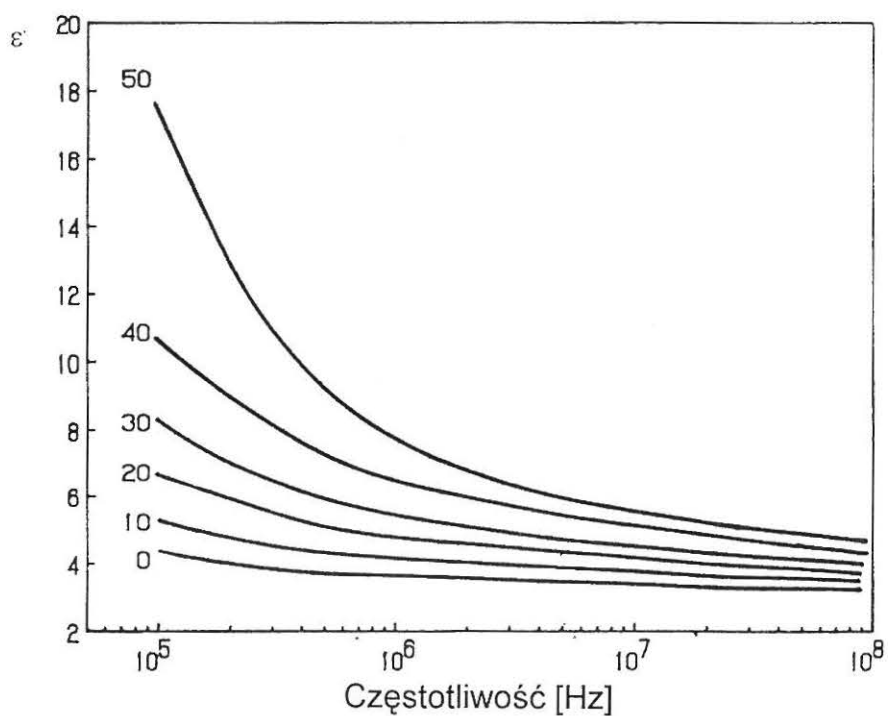


Rys. 4.1. Zastępczy - obwód równoległy RC [47]

Część rzeczywista zespolonej względnej stałej dielektrycznej - ε' wskazuje na zdolność do magazynowania energii w materiale umieszczonym w polu elektrycznym. Jest również ważnym czynnikiem przy określaniu wartości natężenia pola elektrycznego przy projektowaniu i stosowaniu urządzeń do mikrofalowego suszenia i niszczenia insektów w nasionach zbóż.

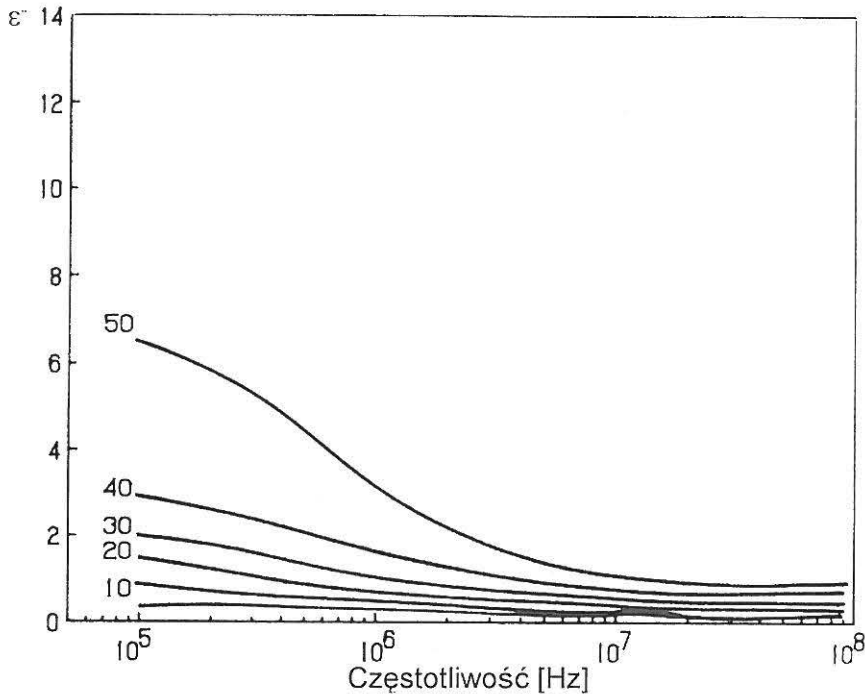


Rys. 4.2. Wykres wektorowy zastępczego obwodu równoległego [47]



Rys. 4.3. Zależność składowej rzeczywistej zespolonej przenikalności elektrycznej ziarna pszenicy ozimej od częstotliwości f , przy $T [^{\circ}\text{C}] = \text{const.}$, $w_w = 17\%$ [43]

Część urojona zespolonej względnej stałej dielektrycznej - ϵ'' związana jest ilością energii jaką dielektryk może rozpraszać w formie ciepła, kiedy jest poddany działaniu przemiennego pola elektrycznego. Określa zdolność materiału do pochłaniania energii przemiennego pola elektrycznego. Jego wartość jest ważna do określania szybkości nagrzewania substancji w procesie grzania w zakresie częstotliwości radiowych oraz mikrofalowych. Zależność stałej dielektrycznej i współczynnika stratności elektrycznej od częstotliwości dla pszenicy ozimej została przedstawiona na rys. 4.3 i rys. 4.4 [43].



Rys. 4.4. Zależność składowej urojonej zespolonej przenikalności elektrycznej ziarna pszenicy ozimej od częstotliwości f przy $T [^{\circ}\text{C}] = \text{const.}$, $w_{\%} = 17 \%$ [43]

Składowa rzeczywista przenikalności elektrycznej (stała dielektryczna) zawsze zmniejsza swoją wartość wraz ze wzrostem częstotliwości, natomiast składowa urojona (wektor strat) może rosnać lub maleć wraz ze wzrostem częstotliwości zależnie od częstotliwości i zawartości wilgoci w ziarnie pszenicy.

Właściwości dielektryczne nasion zbóż zostały wykorzystane w elektrycznych pomiarach zawartości wilgoci w materiałach roślinnych w procesie suszenia dielektrycznego i mikrofalowego.

Zastosowanie grzania dielektrycznego w rolnictwie i przemyśle rolno – spożywczym skupia się głównie na:

- suszeniu nasion zbóż i innych produktów,
- oddziaływaniu na nasiona mającemu na celu poprawę ich zdolności kiełkowania i wzrostu,
- grzaniu produktów w celu poprawy ich wartości odżywczej,
- niszczeniu insektów,
- pasteryzacji,
- sterylizacji.

Właściwości dielektryczne materiałów grzanych metodami mikrofalowymi są również ważne w projektowaniu generatorów tj. wysokoczęstotliwościowych źródeł energii elektrycznej i odpowiednich zasilaczy mocy zarówno w zakresie częstotliwości radiowych jak i mikrofalowych.

4.1. Zastosowanie częstotliwości radiowych

Termin, grzanie dielektryczne w dziedzinie częstotliwości radiowych (RF), odnosi się do częstotliwości z zakresu $1 \div 100$ MHz. Pola o częstotliwościach radiowych były stosowane wcześniej niż pola o częstotliwościach mikrofalowych [43, 49].

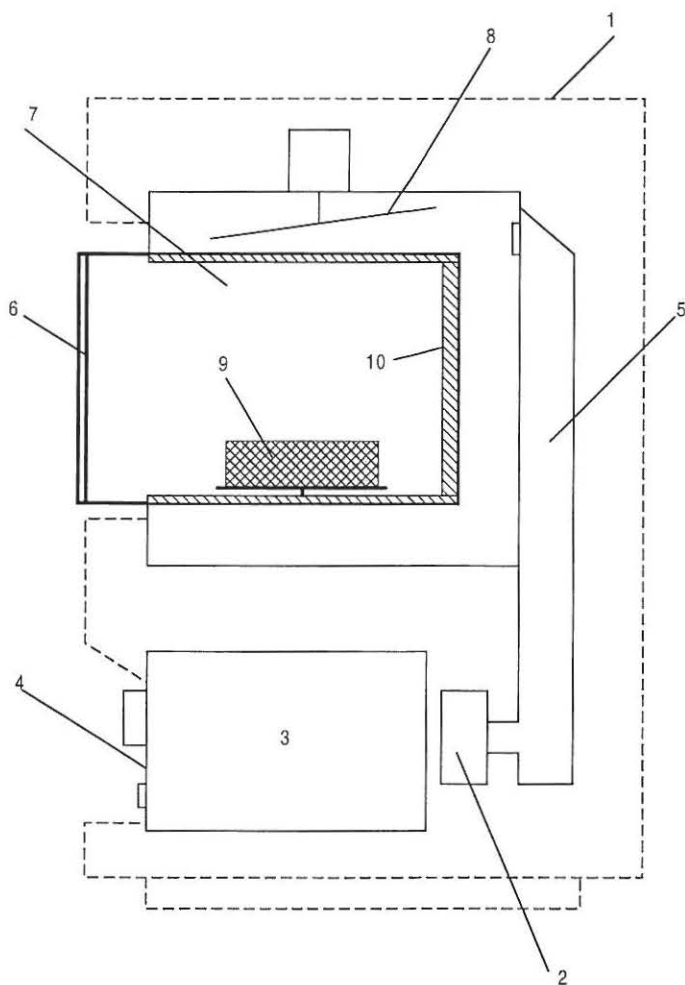
Termin grzanie mikrofalowe odnosi się również do grzania dielektrycznego. Dziedzina ta rozwinęła się po II Wojnie Światowej, kiedy to powstały źródła fal mikrofalowych. Grzanie mikrofalowe dotyczy głównie częstotliwości powyżej 500 MHz [8, 12, 19, 31, 51, 49].

Typowy mikrofalowy system grzewczy przedstawiono na rys. 4. 5 [47]. W jego skład wchodzi:

- prostopadłościenna metalowa wnęka, otaczająca ogrzewaną substancję, z drzwiczkami ekranującymi mikrofałe wewnątrz kuchenki (1, 6, 10),
- zasilacz,
- generator mikrofal (magnetron) przekształcający prąd elektryczny o częstotliwości $f = 50$ Hz na prąd o częstotliwości $f \in (1 \div 100)$ Hz zwany mikrofalami (2),

- falowód (5),
- urządzenie mieszające (dysektor), rozdzielające mikrofałe w komorze grzewczej (7) i zapobiegające tworzeniu się fal stojących (8).

Magnetron jest źródłem mikrofał. Ma postać lampy elektronowej. Mikrofałe dostarczone do komory grzewczej odbijają się od jej ścianek. Kiedy fale przechodzą przez suszony produkt tracą swoją energię w czasie każdego przejścia aż do całkowitego wytłumienia fali.



Rys. 4. 5. Schemat urządzenia grzewczego mikrofalowego [47]

Tab. 4.1. Pasma częstotliwości wydzielone dla mikrofalowych urządzeń grzejnych

Pasmo	Częstotliwość [MHz]	Długość fali [m]
I	915 ± 13	32,79×10 ⁻²
II	2450 ± 50	12,50×10 ⁻²
III	5800 ± 75	5,17×10 ⁻²
IV	24125 ± 125	1,24×10 ⁻²
V	61250 ± 250	0,49×10 ⁻²
VI	122500 ± 500	0,24×10 ⁻²
VII	245000 ± 1000	0,12×10 ⁻²

W dielektrycznym grzaniu przy zastosowaniu częstotliwości z zakresu 1÷100 MHz, grzany materiał umieszczany jest zwykle między dwoma równoległymi, przewodzącymi elektrodami. Natężenie pola elektrycznego między elektrodami jest określone poprzez napięcie o wielkiej częstotliwości przyłożone do elektrod, V i odległość między nimi, d .

Częstotliwość fali jest również czynnikiem wpływającym na wielkość mocy rozpraszanej w dielektryku. W przypadku fali płaskiej, natężenie pola elektrycznego o pulsacji ω jest wyrażone w postaci:

$$E(z) = E_0 e^{j\omega t - \gamma z}, \text{ V/m}, \quad (4.3)$$

gdzie: ω - pulsacja, 1/s,

E_0 – wartość skuteczna natężenia pola elektrycznego, V/m,

t – czas, s,

γ - stała propagacji w środowisku, w którym porusza się fala,

z – odległość na drodze fali, m.

Efekt szybkiego grzania w tym przypadku jest wynikiem zastosowania napięcia o wielkiej częstotliwości radiowej (RF), które umożliwia uzyskanie wysokich strat pola elektrycznego w grzonym materiale. Ograniczenie uzyskiwanych natężeń pola stanowi wytrzymałość dielektryczna obrabianego materiału. Przekroczenie tej wytrzymałości prowadzi do przebicia i uszkodzenia suszonego dielektryka. W przypadku nasion zbóż takich jak pszenica stosuje się natężenia pola elektrycznego 1,4 ÷ 1,5 kV/m.

Wielkość mocy wydzielonej w jednostce objętości dielektryka umieszczonego w zmiennym polu elektromagnetycznym, opisuje z pewnym przybliżeniem równanie [49]:

$$P = E^2 \sigma = 55.63 \cdot 10^{-12} f E^2 \varepsilon'' , \quad (4.4)$$

gdzie: P - moc wydzielona w jednostce objętości, W/m^3 ,

f - częstotliwość, Hz,

E - wartość skuteczna natężenia pola elektrycznego, V/m,

ε'' - współczynnik strat dielektrycznych,

$\sigma = \omega \varepsilon_0 \varepsilon''$ – skrośna konduktywność elektryczna, S/m.

Zgodnie z powyższym równaniem można stwierdzić, że są trzy podstawowe zmienne związane z rozpraszaniem energii w materiale w procesie grzania dielektrycznego:

- pierwszą z nich jest współczynnik strat dielektrycznych ε'' (zależy od częstotliwości, zawartości wilgoci i temperatury),
- drugą natężenie pola elektrycznego,
- trzecią zmienną jest częstotliwość, wywierająca też wpływ na natężenie pola elektrycznego i właściwości dielektryczne, tj. ε' , ε'' (4.3).

Wysoka wartość natężenia pola elektrycznego, może spowodować jonizację powietrza i wyładowania, które prowadzą do gwałtownego wzrostu strat energii w suszonej substancji oraz pogorszenie lub zredukowanie do zera jej jakości. Dla suszonych nasion zbóż, Knipper (1956) podał średnie maksymalne dopuszczalne natężenie pola wynoszące ($4 \times 10^4 \div 12 \times 10^4$ V/m).

Częstotliwość mająca bezpośredni związek z wielkością rozpraszanej mocy, wywiera również wpływ na natężenie pola elektrycznego i właściwości dielektryczne materiału. Do suszenia dielektrycznego zbóż zalecane częstotliwości podane przez Knipperra należą do przedziału (3÷5 MHz). W układzie mieszanym z suszeniem powietrznym i dielektrycznym jest zalecany zakres (1÷1,5 MHz). Użycie niższych częstotliwości zapewnia niższe koszty wyposażenia. Zastosowanie wyższych częstotliwości może natomiast prowadzić do przegrzewania i pogorszenia jakości suszonych nasion.

Knipper i Nelson w przeprowadzonych przez siebie badaniach suszenia w zakresie częstotliwości radiowych oraz mikrofalowych określili wartości stałej dielektrycznej oraz tangensa strat dla kilku zbóż: pszenicy, jęczmienia, owsa, żyta oraz nasion trawy pastwnej.

Zaobserwowane różnice między właściwościami dielektrycznymi nasion wskazują na konieczność stosowania różnych sposobów suszenia dla różnych nasion zbóż.

Moc P wydzielona w jednostce objętości w danym czasie dostarcza energię do wzrostu temperatury suszonego materiału. Szybkość wzrostu temperatury w tym czasie jest określona zależnością [49]:

$$dT / dt = P / (c\rho), \quad (4.5)$$

gdzie: T – temperatura, $^{\circ}\text{C}$,

t – czas, s,

c - ciepło właściwe materiału, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$,

ρ - gęstość materiału, kg/m^3 ,

P – moc wydzielona w jednostce objętości, W/m^3 .

W przypadku grzania dielektrycznego dielektryka warstwowego o dwóch warstwach o przenikalnościach $\underline{\epsilon}_1$, $\underline{\epsilon}_2$, równoległych do siebie i okładek kondensatora, umieszczonego w płaskim kondensatorze, natężenie pola elektrycznego w jednej warstwie wynosi:

$$E_1 = \frac{V}{d_1 + d_2(\underline{\epsilon}_1 / \underline{\epsilon}_2)}, \quad (4.6)$$

$$E_2 = \frac{V}{d_2 + d_1(\underline{\epsilon}_2 / \underline{\epsilon}_1)}, \quad (4.7)$$

gdzie: d_1 , d_2 – odpowiednio grubości dwóch materiałów o zespolonych przenikalnościach elektrycznych $\underline{\epsilon}_1$, $\underline{\epsilon}_2$.

Szybkość suszenia materiałów poddanych działaniu pól elektrycznych o częstotliwościach radiowych wzrasta ze wzrostem natężenia pola elektrycznego i ze wzrostem częstotliwości [49].

4.2. Zastosowanie częstotliwości mikrofalowych

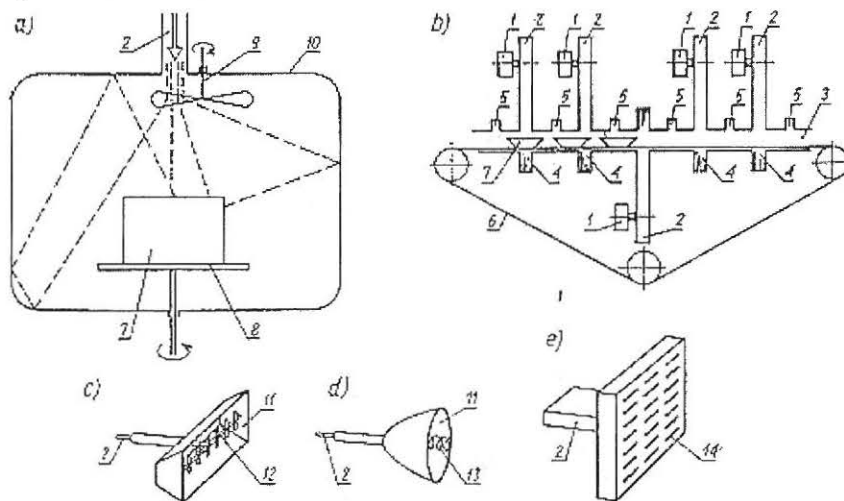
Nagrzewanie mikrofalowe jest to nagrzewanie elektryczne oparte na efekcie polaryzacji w ośrodkach dielektrycznych lub półprzewodnikowych, do których energia elektromagnetyczna wielkiej częstotliwości jest doprowadzana za pośrednictwem falowodu. Technika ta stanowi rozszerzenie metody nagrzewania pojemnościowego, od której różni ją konstrukcja urządzeń i ich eksploatacja. Zwiększenie częstotliwości powoduje wzrost mocy grzejnej. Źródłem mocy grzejnej jest lampa mikrofalowa. Wsad umieszcza się w rezonatorze wnękowym stanowiącym rodzaj komory pieca mikrofalowego, w falowodzie, u wylotu falowodu. Na rozkład mocy we wsadzie mają wpływ

czynnikami związane nie tylko z cechami pola elektromagnetycznego, lecz także z geometrią wsadu oraz konstrukcją urządzenia.

Mikrofalowe suszenie (grzanie) dotyczy głównie częstotliwości wyższych od 500 MHz. W przypadku zastosowania do suszenia częstotliwości mikrofalowych zależności (4.4) i (4.5) są również spełnione, ale znaczenia nabiera tu również głębokość wnikania fali elektromagnetycznej do suszonego materiału (nasion zbóż) oraz współczynnik tłumienia. Szybkie osiągnięcie wysokiej temperatury odbywa się przy dużo mniejszym natężeniu pola elektrycznego (równanie 4.6). Osiągnięcie jednorodnego stopnia suszenia w całym materiale wymaga jednak przesuwania lub obracania suszonych nasion.

Przykłady konstrukcji mikrofalowych urządzeń do nagrzewania wsadu przedstawiono na rys. 4.6:

- rezonator wnąkowy, a,
- tunelowy, b,
- promiennikowe, c, d, e.



Rys. 4.6. Schematy mikrofalowych układów grzejnych: a) komorowy (rezonator wnąkowy); b) tunelowy; c), d) oraz e) promiennikowe. 1 - magnetron, 2 – falowód doprowadzający energię do przestrzeni grzejnej, 3 - tunel (falowód), 4 - obciążenie przejmujące energię mikrofalową przy braku wsadu w tunelu, 5 - dławiki oddzielające sąsiednie magnetrony i zapobiegające ich sprzężaniu, 6 - taśma transportowa, 7 - wsad, 8 - talerz obrotowy, 9 - dysektor, 10 - rezonator wnąkowy, 11 - reflektor, 12 - antena wielodipolowa, 13 - antena helikoidalna, 14 - antena szczelinowa

Każde z nich jest wyposażone w zasilacz wysokonapięciowy z prostownikiem, jedną lub kilka lamp mikrofalowych (magnetrony), w falowód łączący źródło energii z członem grzejnym oraz w podzespoły: do transportu wsadu (w urządzeniach przelotowych), do wprowadzania wsadu w ruch (w wielu odmianach urządzeń nieprzelotowych), wentylatory, układy zabezpieczające obsługę przed promieniowaniem, dodatkowe promiennikowe lub rezystancyjne źródła ciepła, układy sterujące oraz metalowe elementy wirujące lub drgające, które uśredniają natężenie pola elektrycznego E i polepszają równomierność nagrzewania.

Głębokość wnikania D_p definiuje się jako odcinek, na którym moc zmniejsza się e razy w stosunku do wartości na powierzchni suszonego materiału [49].

$$D_p = \frac{1}{2\alpha}, \quad (4.8)$$

gdzie: α - współczynnik tłumienia.

Przykładowo dla pszenicy $D_p = 2$ mm.

Jeśli tłumienie w materiale jest duże, wielkość energii traconej maleje wraz ze wzrostem rzędnej, w kierunku której biegnie fala. Współczynnik tłumienia jest związany z dielektrycznymi właściwościami materiału [49]:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\epsilon'}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)}, \text{ Np/m}, \quad (4.9)$$

gdzie: λ_0 - długość fali elektromagnetycznej w próżni,

Np – neper, jednostka tłumienia.

W materiale o dużych stratach dielektrycznych fala elektromagnetyczna jest tłumiona silniej.

Współczynnik tłumienia podaje się często w decybelach na metr i wyraża jako funkcję składowej rzeczywistej i urojonej zespolonej stałej dielektrycznej:

$$\alpha \cong \frac{8,686 \pi \epsilon''}{\lambda_0 \sqrt{\epsilon'}}, \text{ dB/m}, \quad (4.10)$$

Przykładowo dla pszenicy o wilgotności $w_{\%} = 20$ %, przy częstotliwości 9,4 GHz, $\alpha = 350$ dB/m.

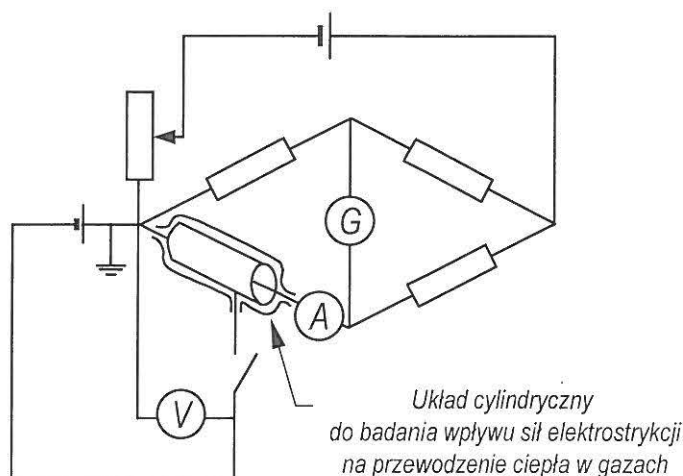
Tłumienie energii fali elektromagnetycznej jest większe przy wyższych częstotliwościach i wilgotnościach nasion zbóż.

5. TEORETYCZNE PODSTAWY ROZWOJU NOWYCH TECHNOLOGII SUSZENIA Z UDZIAŁEM POLA ELEKTRYCZNEGO I OZONU

5.1. Zastosowanie wiatru jonowego

Wzmocnienie wymiany ciepła w gazach badane jest od roku 1931. W tym czasie Senftleben [61] udowodnił, że obecność pola elektrycznego może zwiększyć prędkość konwekcji w stosunku do konwekcji naturalnej.

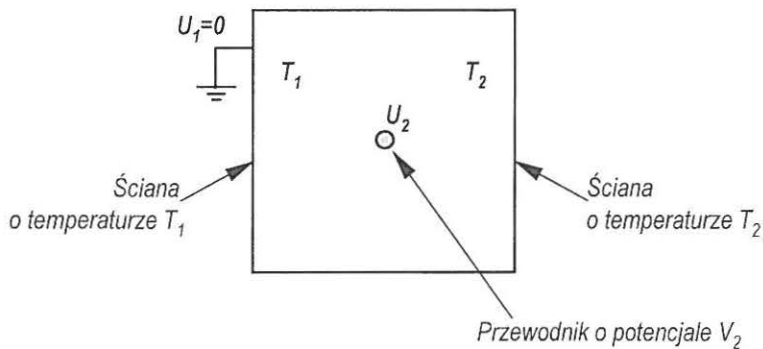
Często spotykanym w literaturze przypadkiem analizy wymiany ciepła jest układ cylindryczny, w którym wymiana ciepła występuje pomiędzy ułożonym poziomo, nagrzanym, cienkim przewodem, a otaczającym go cylindrem o innej temperaturze i innym potencjale elektrycznym [45, 62]. W analizowanym teoretycznie i eksperymentalnie przypadku założono, że w obecności pola elektrycznego nawet w symetrycznych molekułach gazu, wypełniającego przestrzeń pomiędzy przewodem a cylindrem, zaindukuje się moment dipolowy i jeśli dipole posiadają stały moment dipolowy, to dążą do ustawienia się zgodnie z liniami pola elektrycznego.



Rys. 5.1. Schemat układu używanego do badań wpływu sił elektrostrykcyjnych [45]

W rezultacie cząsteczki, które znajdują się w polu elektrycznym będą znajdowały się pod działaniem sił mających źródło w polu elektrycznym, będą przesuwane, co wzmocni dodatkowo przepływ termiczny. Przepływ ten w przypadku konwekcji naturalnej może spowodować wzrost szybkości wymiany ciepła do 50 %.

Opisany uprzednio przypadek dotyczył eksperymentalnych i analitycznych układów, w których źródłem ciepła i pola elektrycznego jest ten sam element (pręt, cienki drut). Wyniki innego typu analizy układu zaprezentowali badacze analizujący przypadek, w którym źródło ciepła nie jest bezpośrednio źródłem pola elektrycznego [33]. Przedmiotem ich rozważań była konwekcja swobodna w szczelinie pionowej o przekroju kwadratowym (rys. 5.2).



Rys. 5.2. Układ do analizy konwekcji swobodnej w obecności pola elektrycznego [33]

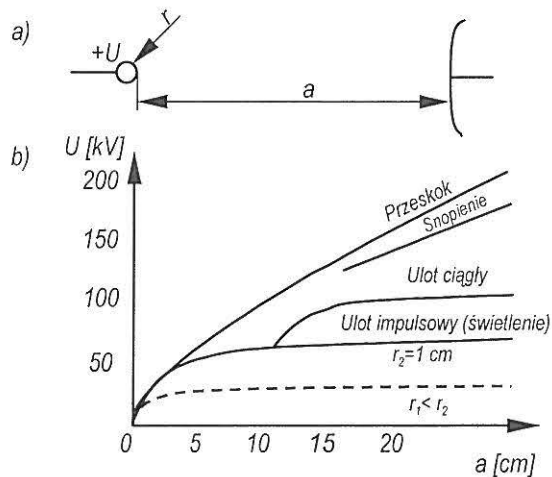
W zaprezentowanym układzie przewodnik o potencjale U_2 umieszczono pośrodku uziemionej komory. Jest on źródłem niejednorodnego pola elektrycznego. Energia cieplna przekazywana jest pomiędzy pionowymi powierzchniami o różnych temperaturach T_1 i T_2 . W wyniku numerycznego rozwiązania równania opisującego układ stwierdzono, że pole elektryczne może zwiększać wymianę ciepła. Powodem tego wzrostu wymiany są siły elektrostrykcyjne pojawiające się w gazie.

Zarówno w przypadku badaczy analizujących wymianę ciepła w układzie cylindrycznym, jak i w przypadku komory, obserwowany wzrost wymiany ciepła powodowany jest niejednorodnym polem elektrycznym. Średnie wartości natężenia pola elektrycznego mogą jednak nie opisywać w pełni zjawisk, które mogły pojawić się w analizowanych przypadkach. Przewody o średnicach małych w porównaniu z otaczającą je drugą elektrodą są źródłem wysokiej niejednorodności pola. W układzie można więc znaleźć takie punkty, w których natężenie pola jest na tyle wysokie, aby wywołać wyładowanie ulotowe (koronowe).

Możliwość zastosowania wiatru jonowego jako elementu intensyfikującego szybkość wymiany ciepła i masy zauważyła inna grupa badaczy [60, 69, 70]. Oprócz tego, że

zwrócono uwagę na wiatr jonowy, to badania prowadzono dla przypadków innych niż konwekcja naturalna, czyli bardziej zbliżonych do przemysłowej praktyki suszenia płodów rolnych.

Układy elektryczne stosowane w tych przypadkach można zakwalifikować do grupy układów typu ostrze-płyta. Taka klasyfikacja wydaje się być poprawna zarówno przy analizie odparowywania wody z powierzchni płaskiej, jak i cylindrycznej. Powierzchnię cylindryczną można w przybliżeniu rozpatrywać jako płaską z powodu jej małego promienia krzywizny (25 mm) w porównaniu z krzywizną ostrzowych elektrod emisyjnych (0,05 mm).



Rys. 5.3. Układ ostrze-płyta i typy wyładowań w zależności od promienia i odległości elektrod [18]

W układzie ostrze-płyta o polu bardzo niejednorodnym napięcie początkowe U_o (U_o - napięcie krytyczne powodujące wystąpienie pola elektrycznego o natężeniu E_o , które w polu jednorodnym inicjuje wyładowanie) jest mniejsze od napięcia przeskoku U_p [18]. Napięcie przeskoku U_p w układzie o polu niejednorodnym jest mniejsze od napięcia przeskoku w polu jednorodnym przy takim samym odstępnie międzyelektrodowym. Jeżeli do układu (rys. 5.3) zostanie doprowadzone napięcie utrzymujące się pomiędzy napięciem krytycznym U_o , a napięciem przeskoku U_p , to w przestrzeni międzyelektrodowej wystąpi przejściowe lub ustalone wyładowanie niepełne. Wyładowanie to ogranicza się do obszaru o największym natężeniu pola i nazywane jest wyładowaniem ulotowym lub koronowym.

Rozwój wyładowania zależy od biegunowości elektrody ulotowej. Jeżeli więc w układzie ostrze- płyta napięcie utrzymywane będzie pomiędzy napięciem początkowym, a napięciem przeskoku, to elektrony swobodne, jony powstające w wyniku zderzeń elektronów z cząsteczkami oraz jony będące wynikiem zjonizowania gazu z otoczeniu elektrody ostrzowej będą przemieszczane w kierunku elektrody o przeciwnym znaku. W trakcie ruchu jony zderzają się z niezjonizowanymi cząsteczkami gazu, z którymi wymieniają pęd. Zjawisko generowania jonów w polu elektrycznym o wysokim natężeniu oraz ich ruch z wymianą pędu z innymi cząstkami nosi nazwę wiatru jonowego. Siła F wprowadzana do układu suszarniczego, pochodząca od wiatru jonowego opisywana jest przez autorów [60, 69] równaniem:

$$F = \alpha \varepsilon A \left(\frac{V - V_o}{a} \right)^2, \quad (5.1)$$

gdzie: α - współczynnik układu elektrod ($\alpha=8/9$ dla elektrod równoległych),

ε - względna stała dielektryczna powietrza,

A - powierzchnia elektrody płaskiej,

V - napięcie pomiędzy elektrodami,

V_o - napięcie progowe ulotu,

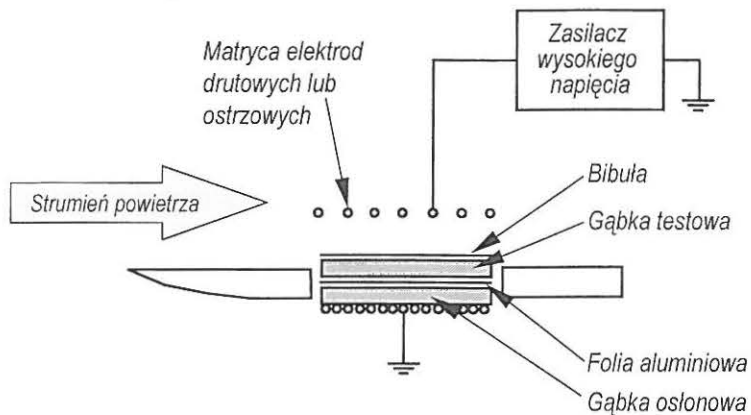
a - odległość pomiędzy elektrodami.

Opierając się na tej sile, jako czynnika intensyfikującym przebieg procesów, badacze analizowali przekazywanie ciepła i masy w układach płaskim (rys. 5.4) i cylindrycznym (rys. 5.5).

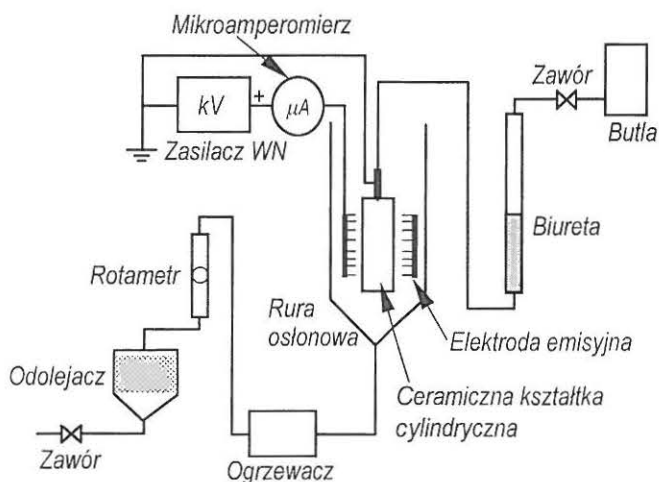
W opisywanej grupie eksperymentów suszonym medium były gąbka nasączona w 85 % wodą (rys. 5.4) lub glinka elektroceramiczna zawierająca do 25 % wody (rys. 5.5). Odległość pomiędzy powierzchnią suszonego materiału, a elektrodą wyposażoną w matrycę elektrod szpilkowych zmieniano od około 0,025 m do 0,047 m (najczęściej 0,025 m).

Zakres napięć zasilających matrycę elektrod wahał się od wartości U_o (progowa wartość napięcia powodującego ulot, zależna od aktualnie stosowanego układu pomiarowego) do wartości maksymalnej 18 kV (układ poziomy - rys. 5.4) i 8 kV (układ pionowy - rys. 5.5). Większość doświadczeń przeprowadzona została dla prędkości powietrza suszącego 0,02 ÷ 0,4 m/s, maksymalnie do 1,5 m/s. Maksymalna wartość

temperatury czynnika suszącego wynosiła 390 K. Duża liczba doświadczeń prowadzona też była w zakresie temperatur 293÷313 K.



Rys. 5.4. Schemat stanowiska do badania wpływu wiatru jonowego na szybkość odparowania wody z powierzchni płaskiej



Rys. 5.5. Schemat stanowiska do badania wpływu wiatru jonowego na szybkość odparowania wody z powierzchni cylindrycznej

Wnioski wynikające z przebiegu doświadczeń:

1. Pole elektryczne generujące wiatr jonowy może zintensyfikować wymianę ciepła i masy w procesie suszenia. Autorzy eksperymentów wskazują nawet na ośmiokrotny

wzrost średnich współczynników wymiany ciepła i masy w stosunku do sytuacji, w których nie stosowano pola elektrycznego [69].

2. Przyspieszenie wymiany ciepła i masy uzyskuje się tylko w układach, w których generowany jest wiatr jonowy. W układzie elektrod płaskich nie zaobserwowano zmiany przebiegu procesu. Podobnie po zastosowaniu drutowej elektrody emisyjnej podłączonej do takiego samego napięcia, jak w przypadku elektrody ostrzowej, efekt przyspieszenia nie zachodzi, ponieważ napięcie progowe ulotu elektrody drutowej jest wyższe niż przypadku elektrody ostrzowej.

3. Wzrost temperatury powietrza intensyfikuje wpływ wiatru jonowego. Tłumaczy się to tym, że wzrost temperatury intensyfikuje jonizację gazu.

4. Przy większej prędkości przepływu gazu na suszoną powierzchnią zmniejsza się efekt oddziaływania pola na przebieg procesów transportu ciepła i masy.

Analizując wymienione informacje pod kątem możliwości zastosowania wspomaganego suszenia zbóż polem elektrycznym należy pamiętać o kilku aspektach różniących opisane badania eksperymentalne od praktyki przemysłowej:

1. W opisywanych przypadkach, głównym czynnikiem intensyfikującym procesy wydaje się być wiatr jonowy. Ograniczenie w rozważaniach wspomaganego do wiatru jonowego wynika z tego, że ewentualne działanie pola elektrycznego nie może wystąpić, ponieważ woda odparowywana jest z materiału (glinka elektroceramiczna), który nie ma właściwości sprężystych, a więc nie wystąpi w nim spodziewana zmiana gabarytów wywołana siłami elektrostrykcyjnymi, których występowanie w ziarnie jest możliwe [57,58].

2. W przeprowadzonych badaniach przebieg procesu był ustalony tzn. na miejsce odparowanej z kształtki z gliny elektroceramicznej wody, doprowadzona była nowa, tak że praktycznie wilgotność suszonego materiału przez cały czas pozostała jednakowa. W przypadku suszenia ziarna zbóż występuje ciągłe obniżanie wilgotności przez co zmieniają się wszystkie parametry procesu.

3. Zauważone przyspieszenie wymiany ciepła (spowodowane przez siły elektrostrykcji pojawiające się w gazie lub siły wiatru jonowego intensyfikujące ruch cząsteczek gazu przez przekazywanie im pędu) występuje tylko w przypadku konwekcji swobodnej lub w przypadku przepływu laminarnego. Suszenie przemysłowe ziarna opiera się na wiele większych wartościach prędkości przepływu powietrza i mamy tam raczej do

czynienia z przepływem turbulentnym, a nie laminarnym. Zaobserwowane dwukrotne przyśpieszenie procesów zachodziło przy prędkości powietrza $0,15 \div 0,40$ m/s [69], a ośmiokrotne przy prędkości $0,020 \div 0,250$ m/s [69]. Nie jest więc, przed przeprowadzeniem odpowiednich prób, zupełnie pewne stwierdzenie, czy ten typ wspomaganie da się zastosować w przypadku ziarna. Konieczne było więc przeprowadzenie prób, których celem było znalezienie odpowiedzi na to pytanie. Podchodzono do nich optymistycznie ponieważ, innego typu eksperymenty suszenia ziarna zbóż w suszarce bębnowej pokazują, że zastosowanie pola elektrycznego może przyśpieszyć suszenie [36].

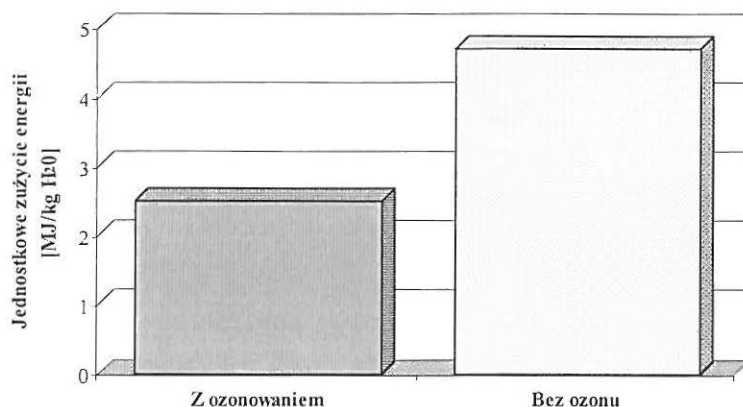
5.2. Zastosowanie ozonu

Ozon został odkryty w 1840 r. Jego bakteriobójcze właściwości znane były już odkrywczy. Pierwsze zastosowanie ozonu miało miejsce w Paryżu w 1896 r. do odkażania wody.

Pomiary zużycia energii przy zastosowaniu ozonowania w trakcie procesu suszenia [39, 40, 41, 42] sygnalizują, że ozon może mieć również znaczenie przy obniżaniu zapotrzebowania na energię potrzebną do suszenia. Jego właściwości fizykochemiczne mimo, że różnią się znacznie od własności tlenu O_2 i powietrza, to nie wskazują, na możliwość oddziaływania na przebieg wymiany ciepła i masy przy suszeniu zwłaszcza, że ozon jest gazem nietrwałym, łatwo ulegającym rozkładowi, a jego zawartość w powietrzu atmosferycznym wynosi $1 \cdot 10^{-7}$ % objętości, kiedy zawartość tlenu O_2 ma wartość 20,946 %.

Krejmeric przeprowadził próby suszenia jęczmienia „Roland” powietrzem domieszkowanym ozonem [41, 42]. Próbka poddawana suszeniu z dodatkiem ozonu miała masę 40 t i ułożona była w warstwie o grubości 3 m. Początkowa wilgotność próbki jęczmienia wynosiła 25 %. Jęczmień suszono do wymaganej wilgotności przez 22 dni przez 220 godzin. Wydajność nawiewu powietrza wynosiła $150 \div 180$ m³/h t. Stężenie mieszanki ozonowo-powietrznej na wylocie ozonatora miało wartość $15 \div 30$ mg/m³ przy stężeniu ozonu w suszonym ziarnie $10 \div 15$ razy mniejszym. Ozon podawany był codziennie przez $1 \div 2$ h. Próbka porównawcza o takiej samej masie suszona była początkowo w warstwie o grubości 1,5 m, by po osiągnięciu wilgotności $17 \div 19$ % zostać umieszczoną w jednej warstwie o grubości 3 m. Jednostkowe zużycie energii potrzebnej

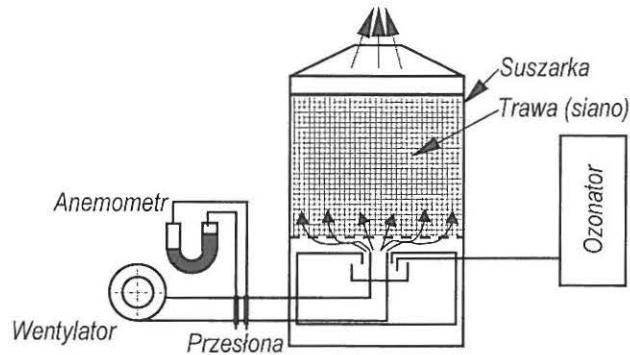
do usunięcia wody osiągnęło wartość 2,5 MJ/kg H₂O przy ozonowaniu i 4,7 MJ/kg H₂O przy braku ozonu. Wskazuje to, że w sytuacji domieszkania powietrza ozonem zużycie energii zmniejsza się 1,86 razy (rys. 5.6).



Rys. 5.6. Jednostkowe zużycie energii dla odparowania wody z próbki jęczmienia Roland [42]

Innego typu badaniami były próby suszenia ziarna w regionach geograficznych o różnych stężeniach ozonu. O ile średnia procentowa zawartość ozonu w powietrzu atmosferycznym wynosi $1 \cdot 10^{-7} \%$, to nad poziomem morza zwiększa się ona do $7 \cdot 10^{-6} \%$ latem i $2 \cdot 10^{-6} \%$ zimą [50]. Próby suszenia ziarna podgrzonym powietrzem z dodatkiem ozonu, wykazały, że dla czterech wybranych regionów Litwy położonych coraz dalej od morza zapotrzebowanie na energię zmniejsza się 1,26; 1,48; 1,77 i 2,17 razy w porównaniu z suszeniem podgrzonym powietrzem bez dodatku ozonu. Domieszkanie ozonem wykazuje na możliwość zaoszczędzenia do 20 % w rejonach nadmorskich i około 54 % w rejonach Wilna. Większa wilgotność początkowa ziarna daje możliwość zaoszczędzenia większych ilości energii [40].

Przy konserwacji traw (zabezpieczania przed działaniem pleśni i zapewniania w ten sposób wysokiej jakości) za pomocą ozonu również zaobserwowano możliwość obniżenia zapotrzebowania na energię. Próby prowadzone były dla świeżo skoszonej trawy o wilgotności większej niż 50 %. Doświadczenia wykonywano w suszarce o pojemności 8 m³ (rys. 5.7). Na wlocie powietrza do suszarki został umieszczony ozonator. Stężenie ozonu zmieniano w granicach 15 ÷ 25 mg/m³.



Rys. 5.7. Schemat suszarki do aktywnego suszenia mieszkanką ozonowo-powietrzną [39]

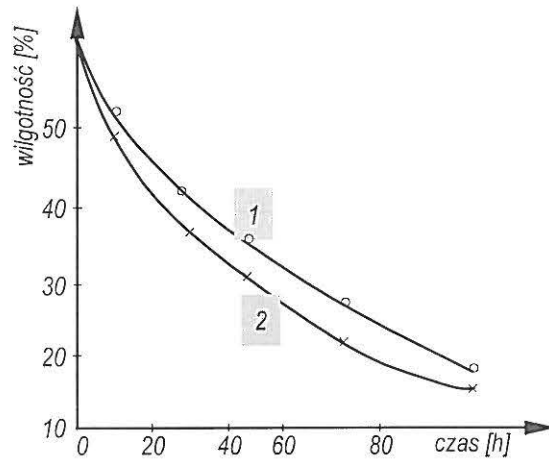
Przebieg procesu suszenia pokazują krzywe zaprezentowane na rys. 5.8. Większe nachylenie krzywej opisującej suszenie powietrzem z dodatkiem ozonu wskazuje na mniejsze zużycie energii, a co za tym idzie możliwość skrócenia czasu suszenia.

Bardziej szczegółowe parametry suszenia traw w obu przypadkach zamieszczono w Tabeli 5.1.

Tab. 5.1 Podstawowe porównawcze parametry procesu suszenia trawy [39]

Sposób suszenia	Numer próbki	Wilgotność [%]	Strumień powietrza [m ³ /h t]	Czas trwania [h]		Energia jednostkowa [MJ/kg H ₂ O]
				Suszenia	Ozonowania	
Zebrane na polu	1	60	5750			
	2	61	3750			
Aktywnie bez ozonu	1	19	5750	103	-	2,0
	2	23	3750	150	-	1,7
Aktywnie z ozonem	1	15	5750	103	11,5	1,8
	2	17	3750	150	10,0	1,6

Na podstawie danych tabeli widać, że przy takich samych czasach suszenia procesy różniły się domieszkowaniem ozonu, a w poszczególnych próbach zastosowano różne natężenie czynnika suszącego. Przy obu szybkościach przepływu podgrzanego powietrza, w przypadku ozonowania, otrzymano mniejsze jednostkowe zapotrzebowanie na usunięcie wody przy dodatkowym doprowadzeniu do niższej końcowej wilgotności siana. Oszczędności energii w obu przypadkach są rzędu 10 %.



Rys. 5.8. Dynamika suszenia trawy przy ozonowaniu (2) i bez (1) [39]

5.3. Zastosowanie sił strykyjnych

W strukturze ziarniaka poddanego działaniu pola elektrostatycznego mogą powstawać naprężenia (siły elektrostrykcyjne) i odkształcenia będące mechaniczną reakcją na siły pola. Są one wynikiem niejednorodności właściwości dielektrycznych środowiska.

Taruszkin [66] wysunął hipotezę, że ściskanie i rozciąganie siłami elektrostrykcyjnymi poszczególnych warstw ziarniaka (przy założeniu, że ziarniak w rozważaniach modelowych odpowiada sferoidzie o strukturze warstwowej) może prowadzić do zmiany jego zdolności do zatrzymywania wilgoci.

Na zewnątrz może to manifestować się zmianą energochłonności procesu suszenia ziarna.

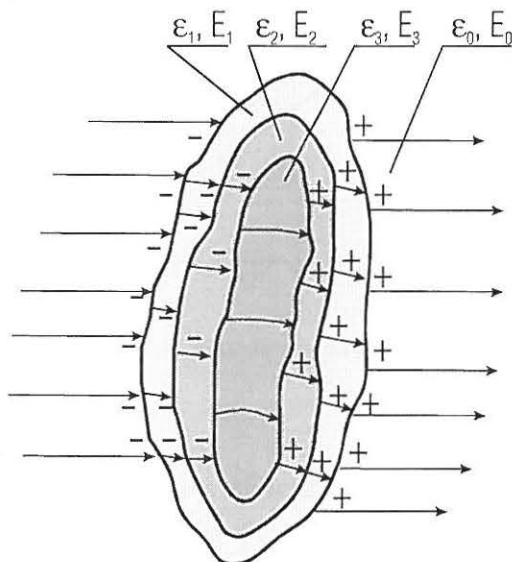
Fizyczny obraz zjawiska powstawania sił elektrostrykcyjnych przedstawia rys. 5.9. Poglądowy obraz sił pola elektrycznego wykonano przy założeniu, że wewnętrzne warstwy ziarniaka mają większą gęstość i większą wilgotność niż zewnętrzne. Zatem przenikalność elektryczna poszczególnych warstw układu się zgodnie z nierównością:

$$\varepsilon_0 < \varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \varepsilon_3, \quad (5.2)$$

gdzie: ε_0 - przenikalność elektryczna powietrza,

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ - przenikalność elektryczna poszczególnych warstw ziarniaka.

Jak widać z rysunku, na granicach warstw ziarniaka (dielektryka - z fizycznego punktu widzenia), umieszczonego w polu elektrostatycznym indukują się ładunki elektryczne. Ich gęstość powierzchniowa zależy od przenikalności elektrycznej sąsiadujących ze sobą warstw.



Rys. 5.9. Rozkład linii sił pola elektrycznego i ładunków elektrycznych (wywołujących siły elektrostrykcyjne) w modelu warstwowym ziarniaka przy założeniu, że $\epsilon_0 < \epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3$ [66]

W wyniku wzajemnego oddziaływania między zaindukowanymi ładunkami wewnątrz ziarniaka, poszczególne warstwy mogą być ściskane, rozciągane lub odkształcane.

Przestrzenny rozkład sił elektrostrykcyjnych i sił powierzchniowych na granicach nieciągłości w sferoidalnym modelu ziarniaka o strukturze warstwowej zbadano analitycznie w pracy [6, 7]. Sporo uwagi uzyskanym tam wynikom poświęcono w pracy [58].

Badania teoretyczne pozwoliły wyznaczyć obok rozkładu sił i naprężeń mechanicznych również ich wartości.

Technologiczna przydatność generowanych na drodze elektrycznej naprężeń mechanicznych (strykcyjnych), do zmniejszenia energochłonności procesu konwekcyjnego suszenia ziarna, może być zweryfikowana tylko na drodze eksperymentalnej. Temu celowi służyły badania, których wyniki przedstawiono w rozdziale 6 i 7.

6. BADANIA WPŁYWU POLA ELEKTROSTATYCZNEGO NA KINETYKĘ SUSZENIA ZIARNA PSZENICY

Opierając się na przesłankach dotyczących możliwości intensyfikowania wymiany ciepła i masy, opisanych w rozdziale 5, takich jak:

- wpływ pola elektrycznego na szybkość wymiany ciepła w gazach przy konwekcji swobodnej dzięki siłom elektrostrykcji generowanym w gazach,
- wpływ sił elektrostrykcyjnych na strukturę wewnętrzną ziarna (rozciąganie i ściskanie poszczególnych warstw ziarniaków umieszczonych w polu elektrycznym),
- intensyfikacja szybkości usuwania wody w obecności wiatru jonowego,
- obniżanie zapotrzebowania na energię przez wprowadzenie do czynnika suszącego domieszki ozonu,

zostało skonstruowane stanowisko, w oparciu o które można sprawdzić, w jakiej mierze przesłanki mogą stać się bazą do wykorzystania wspomaganie suszenia w przypadku suszenia ziarna zbóż.

6.1. Stanowisko badawcze

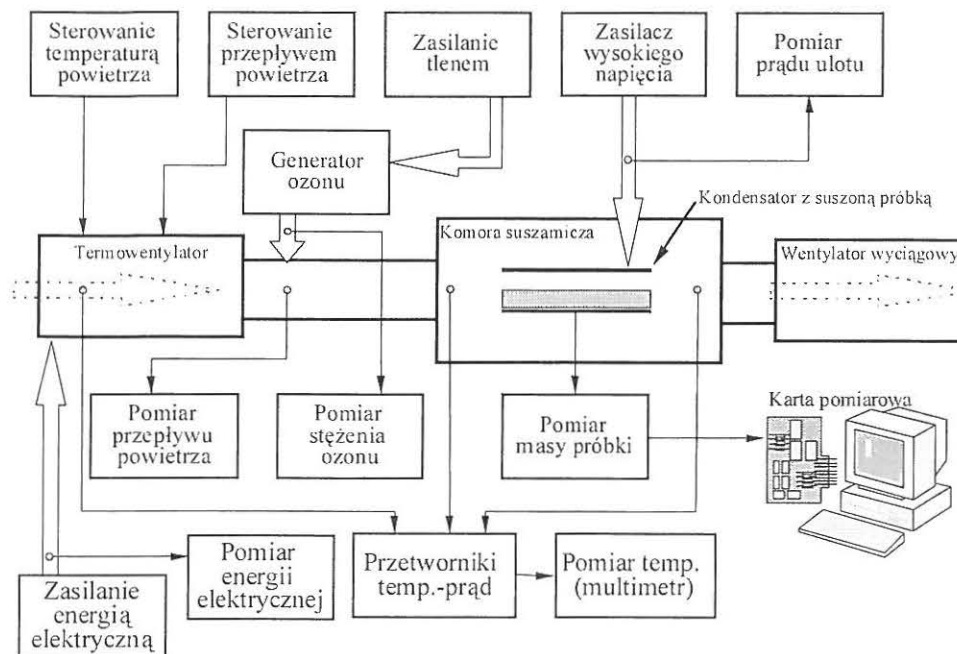
Stanowisko badawcze skonstruowano w oparciu o sprzęt zakupiony w firmach specjalistycznych oraz urządzenia wykonane specjalnie w celu prowadzenia badań. Schemat blokowy stanowiska stosowanego w prowadzonych badaniach pokazuje rys. 6.1.

Przed rozpoczęciem wykonywania pomiarów ziarno było nawilżane w komorze klimatyzacyjnej w celu jego nawilżenia. Dane techniczne komory:

typ	KPW-1,
zakres regulacji temperatury	288÷343 K,
zakres regulacji wilgotności	20÷98 %,
producent	Mytron, Drezno, Niemcy.

Przed umieszczeniem ziarna w komorze suszarniczej wykonywane były czynności wstępne:

- wygrzewanie komory suszarniczej i stabilizowanie jej temperatury,
- inicjowanie programu monitorowania suszenia,
- przygotowanie próbki do suszenia,
- zasypywanie kondensatora pomiarowego.



Rys. 6.1. Schemat blokowy stanowiska badawczego

Przed zasypaniem ziarna do kondensatora, pusta komora pracuje wstępnie przez okres 15 minut, co pozwala na pełne ustabilizowanie temperatury - nagrzanie elementów komory. Inicjacja programu monitorowania suszenia obejmuje zadeklarowanie czasu trwania próby i interwału czasowego pomiędzy kolejnymi rejestracjami masy suszonej próbki. Elementami przygotowania próbki do suszenia są określenie wilgotności próbki oraz rejestracja danych o próbce w protokole pomiarów. Wilgotność nawilżonej próbki jest mierzona przed suszeniem miernikiem wilgotności ziarna. Dane techniczne miernika wilgotności ziarna:

typ	Grainer II PM-300,
zakres pomiarowy	1,0 ÷ 40,0 %,
dokładność	0,2 ÷ 0,5 %,
masa próbki	20 ÷ 180 g,
producent	KETT Electric Laboratory, Tokio, Japonia.

Zasypanie kondensatora obejmuje odważenie próbki ziarna o zadanej masie i umieszczenie jej w postaci pojedynczej warstwy na dolnej okładce kondensatora.

Na czas suszenia kondensator był umieszczany w komorze suszarniczej. Pomiar masy próbki przed suszeniem oraz bieżąca kontrola ubytku masy próbki w trakcie suszenia realizowana jest przez wagę laboratoryjną. Dane techniczne wagi laboratoryjnej:

typ	Precisa 5000 D - 12000 G,
zakres pomiarowy	12400 g,
dokładność	0,1 g,
producent	PAG Oerlikon AG, Zurich, Szwajcaria.

W przyrządach cyfrowych dokładność pomiaru określa się podając trzy wartości:

- procentowy błąd graniczny liczony od wartości końca zakresu,
- procentowy błąd graniczny liczony od wartości aktualnej,
- bezwzględny błąd dyskretyzacji ± 1 jednostka na ostatniej pozycji wyniku.

Przy określaniu masy próbki użytej do pomiarów zachowano dokładność określoną dla mierników laboratoryjnych, tzn. uchyb graniczny miernika $\delta_m \leq 0,5 \%$. Na podstawie tego warunku, masy próbki m_x i wartości błędu bezwzględnego wagi $\Delta = 0,1$ g otrzymujemy:

$$\frac{\Delta}{m_x} \cdot 100 \% \leq 0,5 \% , \quad (6.1)$$

$$m_x \geq 100 \frac{\Delta}{0,5} ,$$

$$m_x \geq 20,0 \text{ g} .$$

Do pomiarów przyjęto próbkę o masie $m_x = 100$ g, co zapewniło wymaganą dokładność pomiarów dla mierników laboratoryjnych, a jednocześnie umożliwiło operowanie próbkami o masie wymaganej do pomiaru wilgotności miernikiem Grainer II PM-300.

Procentowy błąd liczony od wartości aktualnej wynosi zatem:

$$\frac{\Delta}{m_x} \cdot 100 \% = \frac{0,1 \text{ g}}{100 \text{ g}} \cdot 100 \% = 0,1 \% , \quad (6.2)$$

co odpowiada, przy pominięciu błędu dyskretyzacji, klasie dokładności mierników laboratoryjnych.

Wygląd komory suszarniczej zaprezentowano na rys. 6.2. Komora wykonana została ze szkła organicznego. Przednia ściana komory jest demontowalna. Dzięki temu uzyskuje się pełny dostęp do wszystkich jej czujników i zacisków. Komora wyposażona jest

w zestaw czujników pozwalających na pomiar temperatury powietrza na wlocie i wylocie z komory, czujnik sterujący temperaturą powietrza z termowentylatora oraz czujnik anemometru.

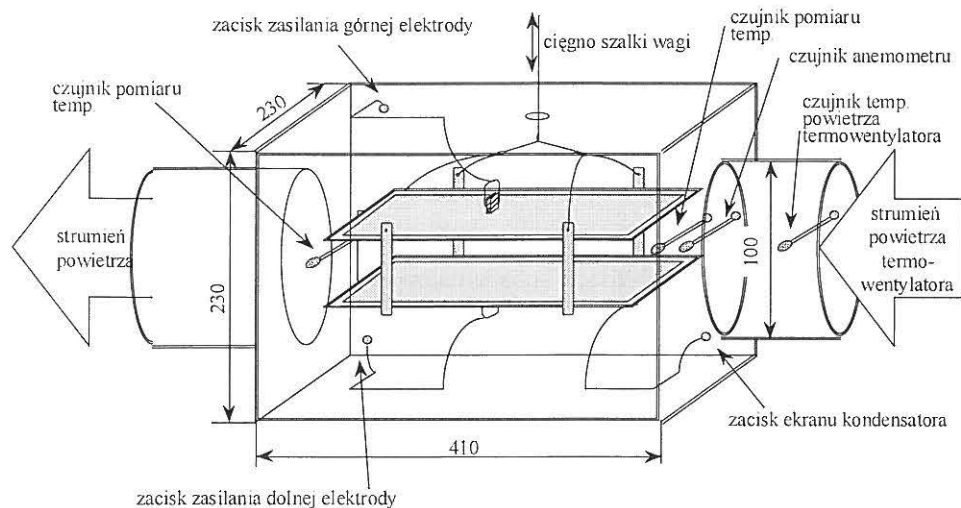
Dane techniczne anemometru:

typ	N-194,
zakres mierzonych	0,1 ÷ 30 m/s - czujnik N-194.0,
prędkości przepływu gazu	0,3 ÷ 30 m/s - czujnik N-194.1,
uchyb pomiaru	0,01 m/s (początek zakresu), 0,5 m/s (koniec zakresu) - czujnik N-194.0,
temperatura pracy czujnika	5 ÷ 60 °C,
zakres kompensacji temp.	10 ÷ 50 °C,
producent	Przedsiębiorstwo Automatyki i Aparatury Pomiarowej, Szczecin.

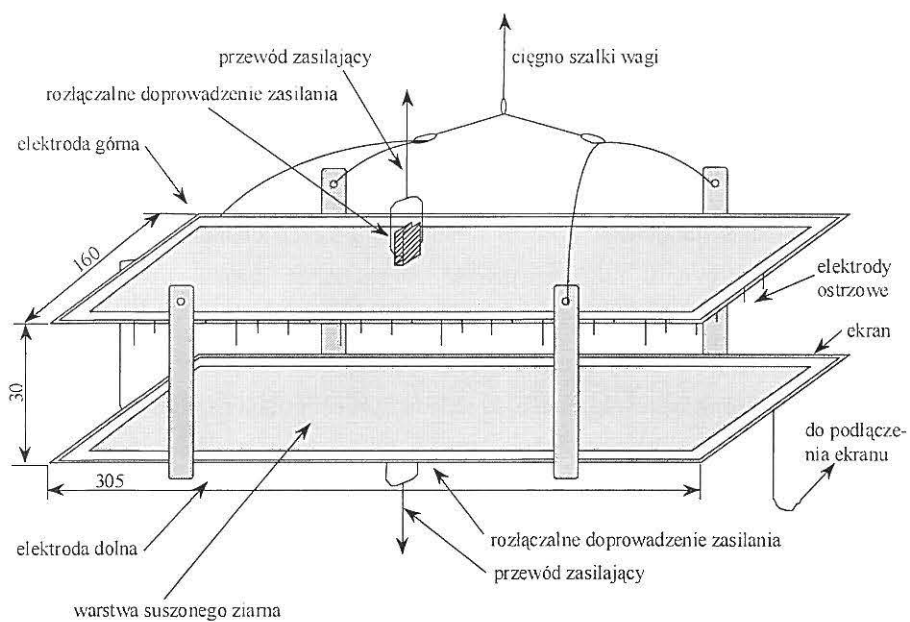
Do eksperymentów stosowano kilka typów kondensatorów suszarniczych. Pierwszy z nich, do pomiarów z polem jednorodnym bez ulotu, wykonany był z dwóch płyt z laminatu o powierzchni przewodzącej umieszczonej na zewnątrz kondensatora.

W kondensatorze do pomiarów w polu niejednorodnym (rys. 6.4 b i c), z ulotem w górnej elektrodzie, zainstalowano zestaw elektrod ostrzowych rozmieszczonych w układzie trójkąta równobocznego. Wewnętrzna strona dolnej elektrody, na której umieszczana jest suszona próbka ziarna, nie jest izolowana, ale pokryta warstwą miedzi. Wymaganą polaryzację okładzin kondensatora uzyskuje się przez dołączenie przewodów zasilacza wysokiego napięcia do zacisków komory. Dane techniczne układu polaryzacji kondensatora:

napięcie	stałe, o regulowanej wartości,
zakres napięć	0 ÷ 30 kV,
pomiar napięcia	multimetr V 640 + sonda wysokiego napięcia P233 V 40.23 (Meratronik, Warszawa),
dokładność pomiaru napięcia	± 1,5 %,
zakres pomiaru prądu	0÷1000 µA,
pomiar prądu ulotu	mikroamperomierz MK-2A (MERA),
dokładność pomiaru prądu	± 1,5 %.



Rys. 6.2. Budowa komory suszarniczej

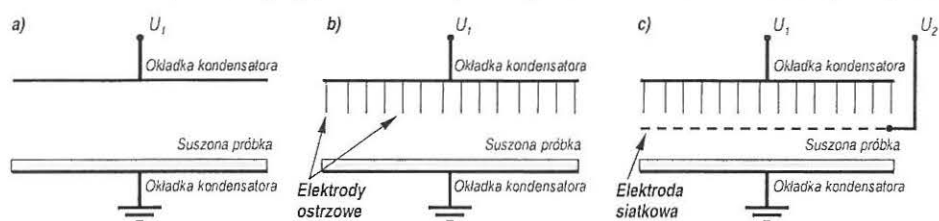


Rys. 6.3. Budowa kondensatora suszarniczego

Ponieważ prowadzono również badania nad określeniem mechanizmu wpływu pola na przebieg suszenia stosowano jeszcze trzeci typ kondensatora. Jego dolna okładka była

płaską powierzchnią pokrytą warstwą miedzi, górna okładka uzbrojona była w zestaw elektrod ostrzowych, zaś pomiędzy nimi została zainstalowana siatka, dzięki której możliwa była zmiana natężenia pola elektrycznego niezależna od wielkości prądu ulotu. Ogólny widok kondensatora pomiarowego pokazano na rys. 6.3, a przekroje przez kondensatory do pomiarów różnego typu oddziaływania na przebieg suszenia na rys. 6.4.

Oprócz wymienionych elementów stanowiska badawczego konieczne jest zwrócenie uwagi na obecność układu stabilizacji i pomiaru temperatury. Dzięki niemu możliwe było utrzymywanie temperatury czynnika suszącego niezależnie od temperatury panującej w laboratorium z dokładnością 1 K. Pomiar temperatury, dokonywany przy pomocy przetworników temperatura-prąd, umożliwiał pomiary w komorze z dokładnością do 0,1 K.



Rys. 6.4. Przekroje kondensatorów pomiarowych: a) do generowania sił elektrostrykcyjnych, b) do generowania wiatru jonowego, c) do generowania wiatru jonowego przy stałej wartości natężenia pola elektrycznego i prądu ulotu

Układ zasilania stanowiska ozonem składał się z trzech elementów. Najważniejszy z nich - generator ozonu, miał możliwość wytwarzania ozonu z powietrza atmosferycznego lub z tlenu. Zdecydowano się na drugie z rozwiązań, tzn. wytwarzanie ozonu z tlenu, ze względu na stabilniejszą pracę układu oraz mniejsze zużycie elektrod ozonatora. Ilość ozonu wprowadzanego do układu była określana na podstawie zawartości ozonu w mieszance tlenowo-powietrznej opuszczającej generator (przy kontrolowanym przepływie tlenu zasilającego generator).

Wprowadzana do układu energia elektryczna była kontrolowana w dwóch punktach układu. Po pierwsze, układ zasilania kondensatora pomiarowego wysokim napięciem wyposażono w dodatkowy mikroamperomierz, dzięki któremu możliwa była rejestracja wartości prądu ulotu przy znanej wartości napięcia zasilającego. Z drugiej strony mierzona była ilość energii elektrycznej dostarczanej do grzałki termowentylatora.

Dodatkowymi elementami, które pełniły w układzie rolę kontrolną były umieszczone na wlocie powietrza do komory suszarniczej anemometr i termohigrometr.

6.2. Przebieg konwekcyjnego suszenia ziarna pszenicy w jednorodnym polu elektrostatycznym

Pomiary przebiegu suszenia w jednorodnym polu elektrycznym prowadzone były w kondensatorze płaskim, którego przekrój zaprezentowano na rys. 6.4 a. W takim układzie pomiarowym próbka ziarna pszenicy znajdowała się w jednorodnym polu elektrycznym. Próby suszenia wykonywane były dla obu polaryzacji okładek kondensatora. W układzie nie występował ulot (brak mierzalnego prądu ulotu, wartość natężenia pola nie mogła spowodować przepływu prądu ze względu na właściwości izolacyjne powietrza).

Przeprowadzono następujące serie pomiarów:

1. Zakres prędkości powietrza suszącego 0,3; 1,4 m/s.
2. Zakres stosowanego natężenia pola - 0, 200, 300, 400 kV/m.
3. Zakres temperatur powietrza 30, 35, 40 °C (303, 308, 313 K).

Przeprowadzone próby upoważniają do przedstawienia takich wniosków:

1. Bez względu na stosowaną prędkość suszącego powietrza, natężenie pola elektrycznego oraz temperaturę suszącego powietrza nie stwierdzono wpływu pola elektrycznego na przebieg suszenia.

2. Na podstawie braku przyśpieszenia suszenia, można mówić o tym, że nie została potwierdzona teza Taruszkina [66] mówiąca o możliwości wykorzystania sił strykyjnych w procesach suszenia nasion zbóż.

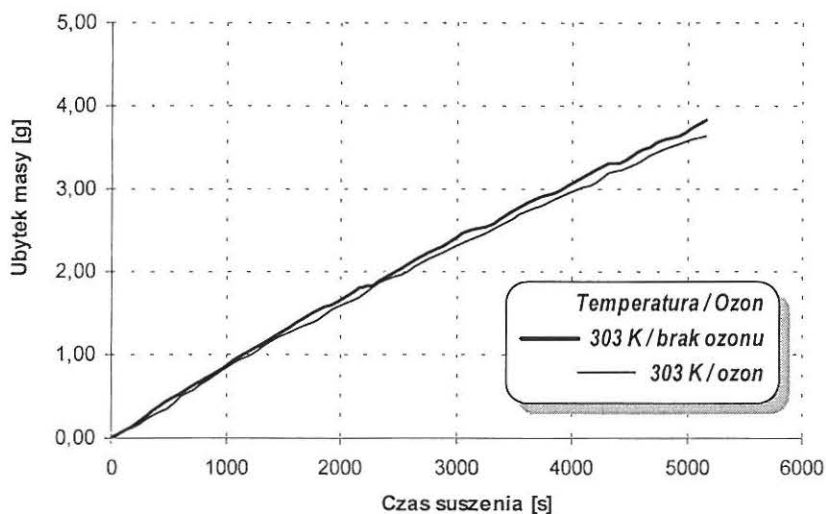
6.3. Przebieg suszenia ziarna pszenicy mieszkanką ozonowo-powietrzną

Badania wspomaganie suszenia ziarna pszenicy mieszkanką ozonowo-powietrzną prowadzono dla dwóch przypadków:

1. Suszenia powietrzem domieszkowanym ozonem bez obecności pola elektrycznego, przy podgrzewaniu powietrza suszącego.
2. Suszenia powietrzem domieszkowanym ozonem w obecności pola elektrycznego z wiatrem jonowym, przy braku podgrzewania powietrza suszącego.

Wykresy opisujące dwa wybrane przypadki z pierwszej grupy pomiarów umieszczono na rys. 6.5 i 6.6. Pomiary prowadzone były dla temperatur 303, 308 i 313 K. Stężenie ozonu w czasie procesu suszenia było stałe i wynosiło 14 mg/m³. Celem

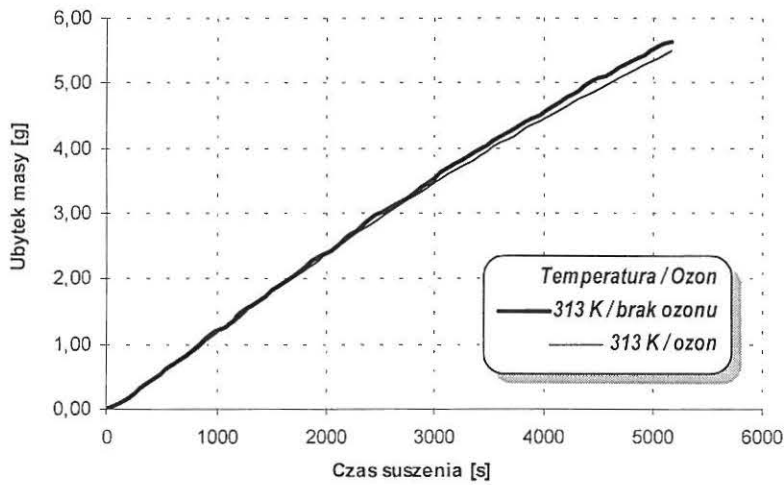
pomiarów było potwierdzenie tezy Krejmerica [41] mówiącej, że domieszkowanie czynnika suszącego ozonem, skraca czas suszenia i zmniejsza zapotrzebowanie energetyczne.



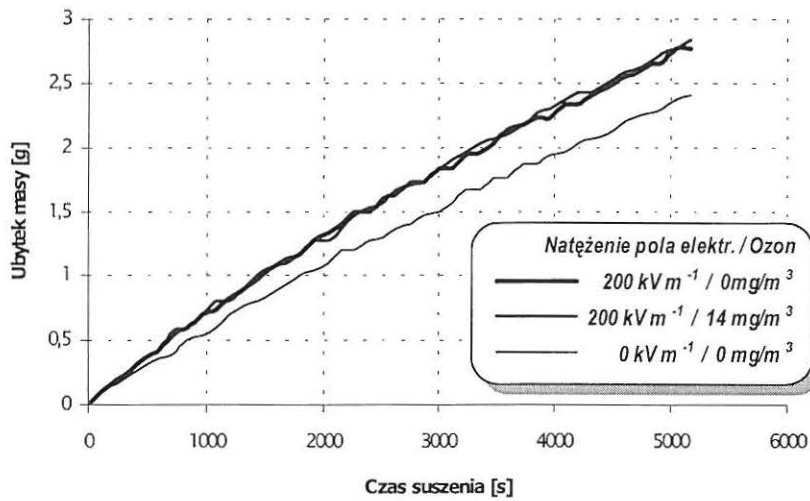
Rys. 6.5. Masa usuniętej wody w funkcji czasu przy suszeniu mieszkanką ozonowo-powietrzną ($T=303\text{ K}$, stężenie ozonu 14 mg/m^3)

Analizując przebiegi czasowe masy wody odparowanej z suszonej próbki w żadnym z przypadków nie zaobserwowano wzrostu masy odparowanej wody spowodowanej wprowadzeniem ozonu do suszącego powietrza. W związku z tym, można stwierdzić, że suszenie konwekcyjne powietrzem domieszkowanym ozonem nie przyspiesza suszenia, a tym samym w przypadku pszenicy nie zostały potwierdzone wyniki zaprezentowane przez Krejmerica [39, 40, 41, 42].

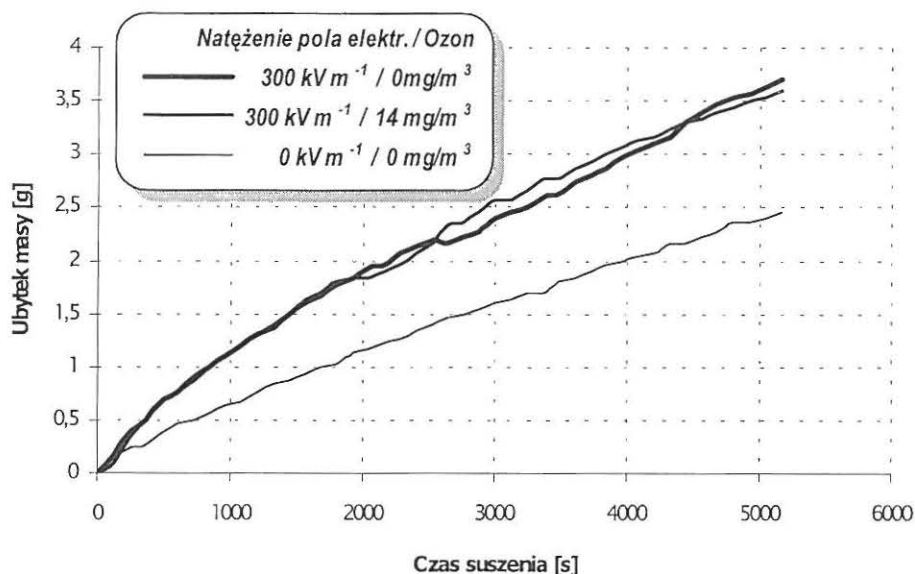
Próby suszenia powietrzem domieszkowanym ozonem w obecności pola elektrycznego z wiatrem jonowym przy braku podgrzewania powietrza suszącego prowadzono w kondensatorze pomiarowym wyposażonym w matrycę elektrod szpilkowych (rys. 6.4 b). Powietrze suszące próbkę nie było podgrzewane i utrzymywało temperaturę otoczenia ($288 \div 294\text{ K}$). Kontrolowanymi wartościami były natężenie pola i stężenie ozonu. Wartości stosowanego natężenia pola miały wartości 0, 200, 300, 400 kV/m. Przebieg czasowy odparowywania wody dla przypadków oddziaływania pola o natężeniu 200 i 300 kV/m zaprezentowano na rys. 6.7 i 6.8.



Rys. 6.6. Masa usuniętej wody w funkcji czasu przy suszeniu mieszanką ozonowo-powietrzną ($T=313\text{ K}$, stężenie ozonu 14 mg/m^3)



Rys. 6.7. Masa usuniętej wody w funkcji czasu przy suszeniu mieszanką ozonowo-powietrzną w polu elektrycznym z wiatrem jonowym ($E=200\text{ kV/m}$, stężenie ozonu 14 mg/m^3)



Rys. 6.8. Masa usuniętej wody w funkcji czasu przy suszeniu mieszanką ozonowo-powietrzną w polu elektrycznym z wiatrem jonowym ($E=300 \text{ kV/m}$, stężenie ozonu 14 mg/m^3)

Na podstawie wykresów ubytku masy wody można stwierdzić, że:

1. Samo wprowadzenie ozonu w przypadku suszenia w obecności pola elektrycznego z wiatrem jonowym nie przyspiesza usuwania wody w porównaniu z suszeniem bez ozonu w obecności pola elektrycznego z wiatrem jonowym.

2. Widoczne na wykresach przyspieszenie usuwania wody wynika z zastosowania pola elektrycznego z wiatrem jonowym.

6.4. Przebieg suszenia pszenicy w obecności pola elektrycznego i wiatru jonowego

Przeprowadzono następujące serie pomiarów:

1. W kondensatorze z matrycą igieł (wiatr jonowy, rys. 6.4 b), w kondensatorze z matrycą igieł i siatką (wiatr jonowy o kontrolowanej wartości prądu, rys. 6.4 c).

2. Zakres prędkości powietrza suszącego $0,3 - 1,4 \text{ m/s}$.

3. Zakres stosowanego natężenia pola - $0, 200, 300, 400 \text{ kV/m}$.

4. Zakres temperatur powietrza $30, 35, 40, 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ($303, 308, 313, 323 \text{ K}$).

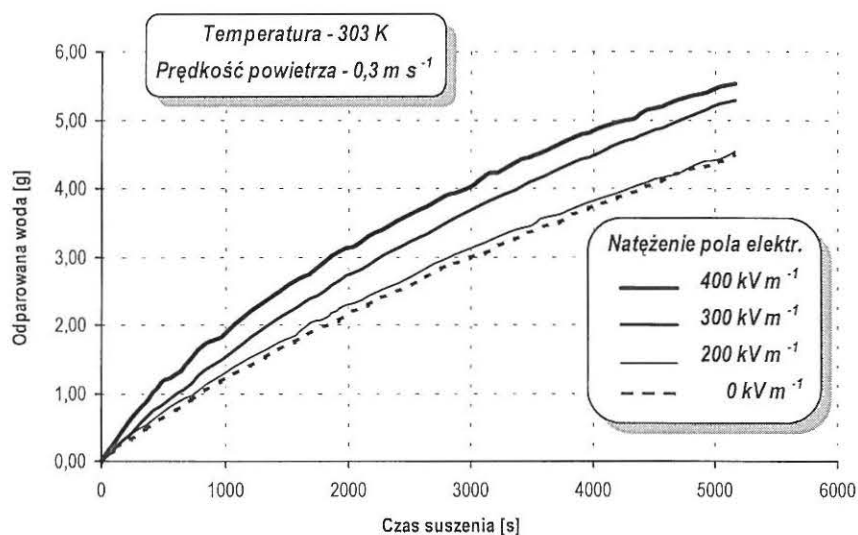
Podstawowe wyniki pomiarów można przedstawić w dwóch punktach:

1. Przy dużych prędkościach przepływu powietrza, większych niż 0,3 m/s, nie dało się zarejestrować mierzalnych zmian w przebiegu suszenia próbki poddanej działaniu pola i próbki porównawczej.

2. Wzrost temperatury potęguje intensyfikację wpływu wiatru jonowego na szybkość usuwania wody.

W związku z tym w dalszej części zostaną zaprezentowane wybrane wyniki dla układu pomiarowego i zakresu prędkości powietrza, które gwarantują przyspieszenie procesu suszenia (suszenie w układzie z kondensatorem pomiarowym wyposażonym w matrycę igieł przy prędkości przepływu powietrza równej 0,3 m/s).

Przebieg procesu suszenia konwekcyjnego można zaprezentować na kilka sposobów: jako wykres czasowy masy wody usuwanej z suszonej próbki (np. rys. 6.9), jako krzywe suszenia czyli wykres zależności zawartości wody w próbce w funkcji czasu oraz ilustrujące dynamikę suszenia – krzywe szybkości usuwania wody z suszonej próbki pszenicy Roma.

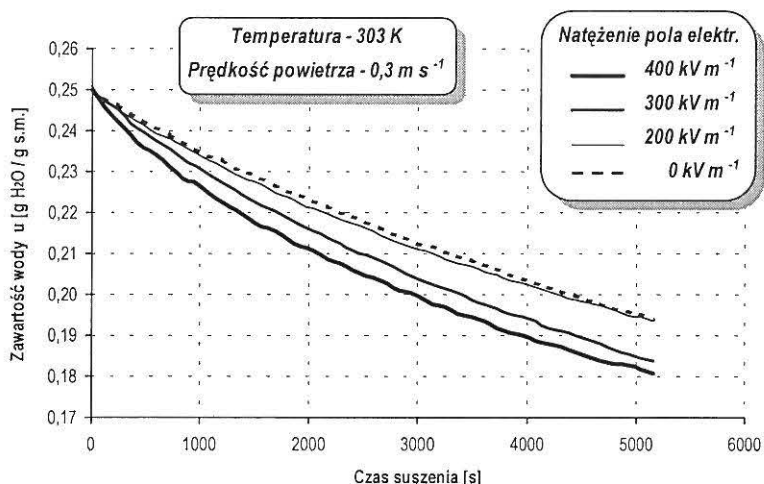


Rys. 6.9. Masa usuniętej wody w funkcji czasu suszenia

Najbardziej widoczne efekty oddziaływania pola można zaobserwować przy suszeniu powietrzem o maksymalnej ze stosowanych temperatur i maksymalnym używanym

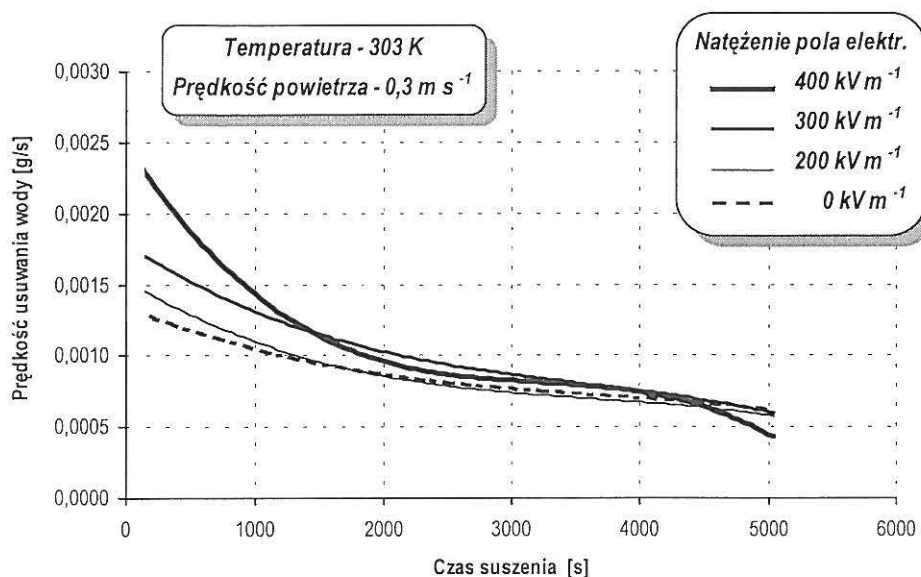
natężeniu pola elektrycznego (400 kV/m). Na rys. 6.9 pokazano przebieg usuwania wody przy suszeniu w temperaturze 303 K. Nie pokazuje on właściwości samej próbki, ale widać, że nawet przy tej temperaturze zastosowanie nawet pola elektrycznego o niewielkim natężeniu razem z wiatrem jonowym powoduje usunięcie większej masy wody niż w przypadku braku pola. Pole elektryczne powoduje, że po 1,5 h suszenia różnica mas odparowanej wody może osiągnąć wartość 1 g.

Krzywe suszenia, zaprezentowane na rys. 6.10, potwierdzają fakt przyśpieszania suszenia z rys. 6.9. Próbkę poddanej działaniu wiatru jonowego z polem elektrycznym o natężeniu 400 kV/m osiąga końcową zawartość wilgoci próbki nie poddanej działaniu pola około 0,5 h wcześniej.

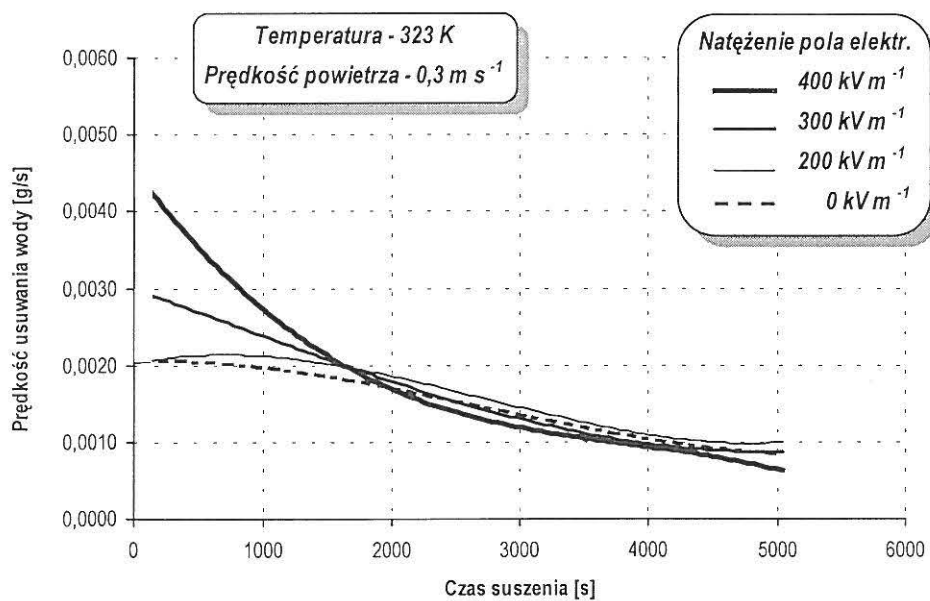


Rys. 6.10. Krzywe suszenia pszenicy Roma

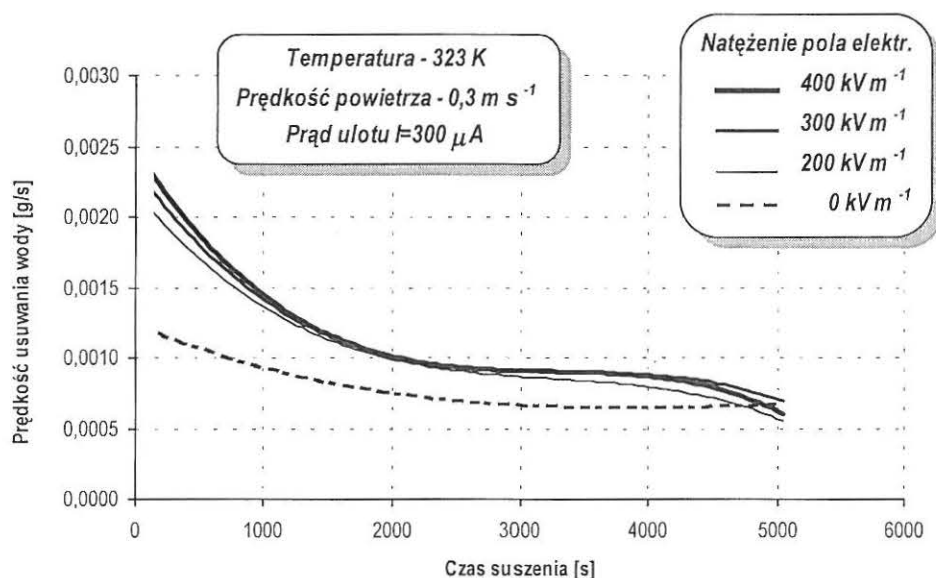
Trzecia grupa krzywych (rys. 6.11, 6.12, 6.13) pokazuje prędkość usuwania wody. Zaprezentowane krzywe są aproksymacją rezultatów pomiarów za pomocą wielomianów trzeciego rzędu. Zwiększenie natężenia pola elektrycznego przy występowaniu wiatru jonowego zwiększa początkową szybkość usuwania wody. Na rysunku 6.11 widać, że zastosowanie pola elektrycznego może w początkowej fazie suszenia około dwukrotnie zwiększyć szybkość usuwania wody. Ten sam efekt widać jeszcze bardziej wyraźnie przy zwiększonej temperaturze suszenia (323 K) - rośnie szybkość usuwania wody i rośnie różnica w szybkości usuwania wody przy różnych natężeniach pola.



Rys. 6.11. Prędkość usuwania wody w trakcie suszenia pszenicy Roma w temp. 303 K



Rys. 6.12. Prędkość usuwania wody w trakcie suszenia pszenicy Roma w temp. 323 K



Rys. 6.13. Prędkość usuwania wody w trakcie suszenia pszenicy Roma w temp. 323 K i stałym prądzie ulotu $I=300\mu\text{A}$

Efekt przyspieszenia usuwania wody występujący w początkowej fazie suszenia zanika w dalszej części procesu. Oznacza, to że wspomaganie suszenia możliwe jest tylko w przypadku dużych wilgotności ziarna. Mimo, że przy suszeniu w temperaturze 303 K i 323 K początkowo występuje dwukrotne przyspieszenie odparowywania wody, to potem zanika ono tym szybciej im próbka zawiera mniej wody. W przypadku temperatury 303 K pole powoduje przyspieszenie suszenia prawie do samego końca suszenia. Przy temperaturze 323 K prędkość usuwania wody w obecności pola elektrycznego osiąga wartość prędkości usuwania przy braku pola elektrycznego już po około 0,5 h trwania procesu (rys. 6.12). Fakt ten wywołany jest zmniejszeniem wartości natężenia prądu ulotu. Suszone ziarno zbóż zmniejsza swoją wilgotność, osiąga przez to większą rezystancję, co zmienia rozkład pola w ten sposób, jakby okładki kondensatora oddalały się i zmniejsza się wartość prądu ulotu, przez co oddziaływanie wiatru jonowego słabnie.

Na zbadanie sytuacji, w której w trakcie suszenia utrzymywana jest stała wartość natężenia pola elektrycznego przy stałej wartości prądu ulotu pozwala układ pomiarowy z kondensatorem wyposażonym w matrycę elektrod szpilkowych i elektrodę siatkową

(rys. 6.4 c). Szybkość usuwania wody z próbki pszenicy Roma przy stałej wartości natężenia pola elektrycznego i stałej wartości prądu ulotu ($I=300\mu A$) pokazano na rys. 6.13. Krzywe potwierdzają szybsze usuwanie wody przy wyższej wilgotności ziarna oraz fakt, że szybkość usuwania wody zależy od wiatru jonowego. Zależność od natężenia pola elektrycznego występuje, ale jest znacznie mniejsza.

Prezentowane wyniki badań można podsumować w kilku punktach:

1. Przy suszeniu w układzie, w którym występuje wiatr jonowy, proces suszenia konwekcyjnego jest przyśpieszany.
2. Zwiększenie efektu wiatru jonowego i natężenia pola elektrycznego powoduje zwiększenie szybkości parowania.
3. Przyśpieszenie usuwania wody w polu elektrycznym występuje przy małych szybkościach przepływu powietrza suszącego (tu 0,3 m/s).
4. Szybkość usuwania wody zależy bardziej od natężenia prądu ulotu, a mniej od natężenia pola elektrycznego.

6.5. Określenie współczynników wymiany ciepła i masy

Procesy wymiany ciepła i wymiany masy traktuje się zwykle oddzielnie i niezależnie, jednak przy rozpatrywaniu procesu suszenia są one ze sobą nierozzerwalnie związane. Jednym ze sposobów opisu dynamiki procesu suszenia może być określenie współczynników wymiany ciepła i masy. Samo podanie jednej wartości współczynnika będzie tu niewystarczające, ponieważ ze względu na zmianę parametrów suszonego ziarna, zmieniają się warunki suszenia.

Proces wnikania masy z powierzchni do powietrza można opisać równaniem [28]:

$$G_A = \beta_A F \Delta \pi_A, \quad (6.3)$$

gdzie: G_A - szybkość wnikania masy, g/s,

β_A - współczynnik wymiany masy, $g/(m^2 s)$,

F - pole powierzchni, m^2 ,

$\Delta \pi_A$ - bezwymiarowy moduł napędowy (zależny od ciśnienia cząstkowego gazu dyfundującego i średniego gazu obojętnego) .

Współczynnik wymiany masy określa, jaka masa czynnika przenika w jednostce czasu pomiędzy suszoną powierzchnią a czynnikiem suszącym.

Współczynniki wymiany ciepła i masy zostały obliczone przy przyjęciu następujących założeń:

1. Suszoną próbkę zboża traktuje się jako pojedynczą powierzchnię o wielkości równej powierzchni okładki kondensatora. Złoże próbki umieszczanej w kondensatorze było jednowarstwowe.

2. Pomiędzy próbką a czynnikiem suszącym w czasie całego procesu suszenia występuje stała różnica temperatur równa różnicy pomiędzy temperaturą powietrza suszącego a temperaturą otoczenia.

Ponieważ ze względu na zmianę parametrów suszonego ziarna, zmieniają się warunki suszenia, współczynniki zaprezentowane są w postaci wykresów. Wykresy pozwalają na prześledzenie zmiany wartości współczynników w każdym punkcie suszenia. Wykresy odpowiadają przypadkom prób pomiarowych, które pokazano w punkcie 6.4.

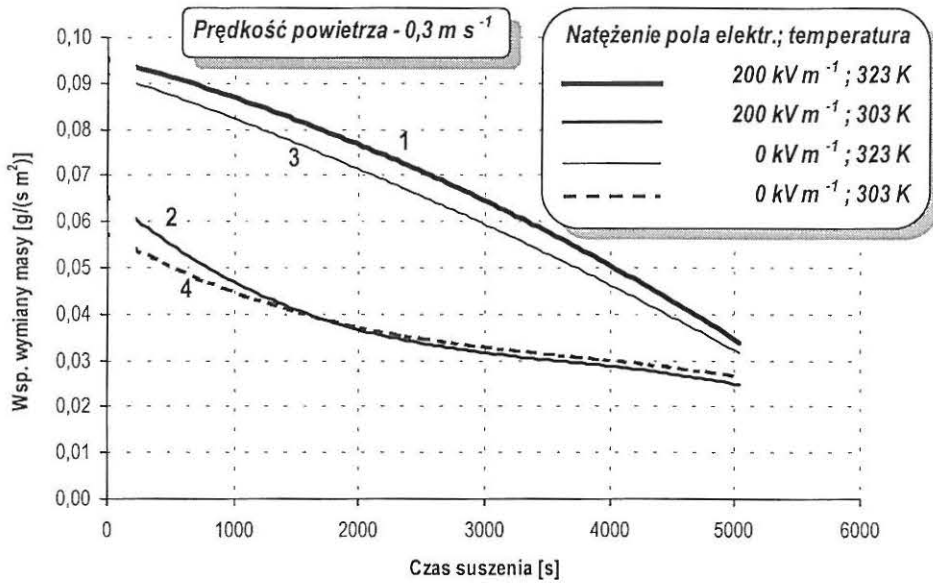
Wykresy przebiegu współczynników wymiany masy (rys. 6.14 i 6.15) potwierdzają spostrzeżenia, które można było poczynić przy analizie krzywych suszenia i krzywych szybkości usuwania wody:

- wyższej temperaturze suszącego powietrza towarzyszy większy współczynnik wymiany masy (rys. 6.14 i 6.15; krzywe 1 i 3 odpowiadają temperaturze 323 K, krzywe 2 i 4 odpowiadają temperaturze 303 K);

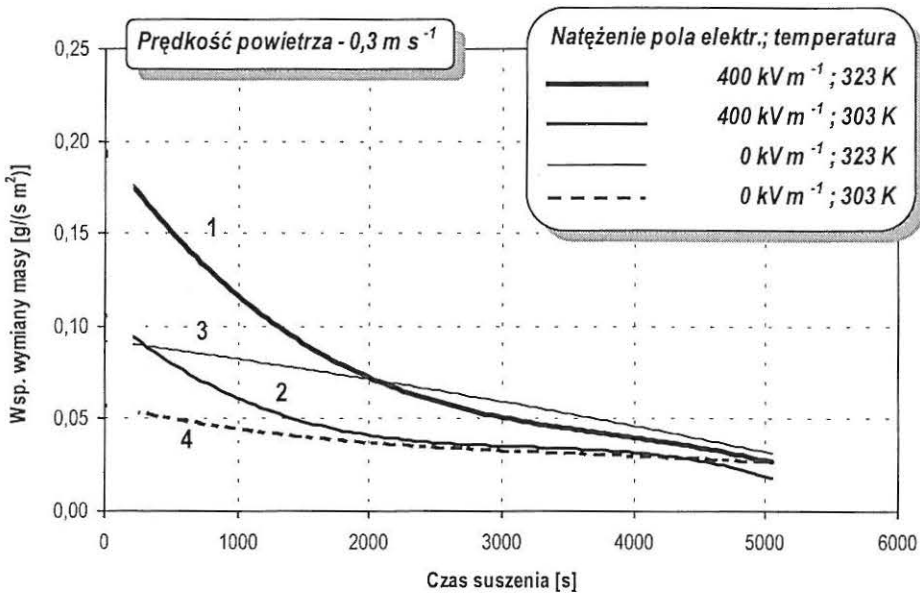
- wprowadzenie pola elektrycznego wywołuje zwiększenie wartości współczynników wymiany masy (krzywe 1 i 2 z polem, krzywe 3 i 4 bez pola);

- zwiększenie współczynnika wymiany masy, spowodowane występowaniem pola elektrycznego z wiatrem jonowym, występuje zwłaszcza w początkowym okresie suszenia - przy dużej wilgotności suszonego ziarna. Zjawisko uwidacznia się wraz ze wzrostem natężenia pola. O ile przy natężeniu 200 kV/m i temperaturze 323 K (rys. 6.14, krzywe 1 i 3) pole elektryczne zwiększało współczynnik wymiany masy przez cały 1,5 godzinny okres suszenia, to wpływ pola z wiatrem jonowym przy natężeniu 400 kV/m i temperaturze 323 K (rys. 6.15, krzywe 1 i 3) widoczny jest tylko przez około 30 minut;

- zastosowanie wspomaganie suszenia polem elektrycznym o natężeniu 400 kV/m ($\beta_A=0,12 \text{ g/(s m}^2\text{)}$) może przyspieszyć wymianę masy w początkowej fazie suszenia bardziej niż podniesienie temperatury o 20 K ($\beta_A=0,09 \text{ g/(s m}^2\text{)}$) (rys. 6.15, krzywe 2 i 3).



Rys. 6.14. Współczynnik wymiany masy w funkcji czasu suszenia dla natężenia pola 200 kV/m



Rys. 6.15. Współczynnik wymiany masy w funkcji czasu suszenia dla natężenia pola 400 kV/m

Proces wnikania ciepła do powierzchni można opisać równaniem podstawowym [28]:

$$Q = \alpha F(t_1 - t_2)\tau, \quad (6.4)$$

gdzie: Q - ciepło potrzebne do odparowania wody, J,

α - współczynnik wymiany ciepła, $J/(m^2 \text{ s K})$,

F - pole powierzchni, m^2 ,

$(t_1 - t_2)$ - różnica temperatur pomiędzy czynnikiem suszącym a suszonym obiektem, K,

τ - czas, s.

Współczynnik wymiany ciepła α określa, ile ciepła wnika w ciągu jednostki czasu od czynnika suszącego do jednostki suszonej powierzchni przy jednostkowej różnicy temperatur pomiędzy czynnikiem suszącym a suszonym:

$$\alpha = \frac{\Delta m}{\Delta \tau} \frac{r}{F(t_1 - t_2)}, \quad (6.5)$$

gdzie: $\Delta m/\Delta \tau$ - masa wody Δm odparowana z próbki w czasie $\Delta \tau$, kg/s,

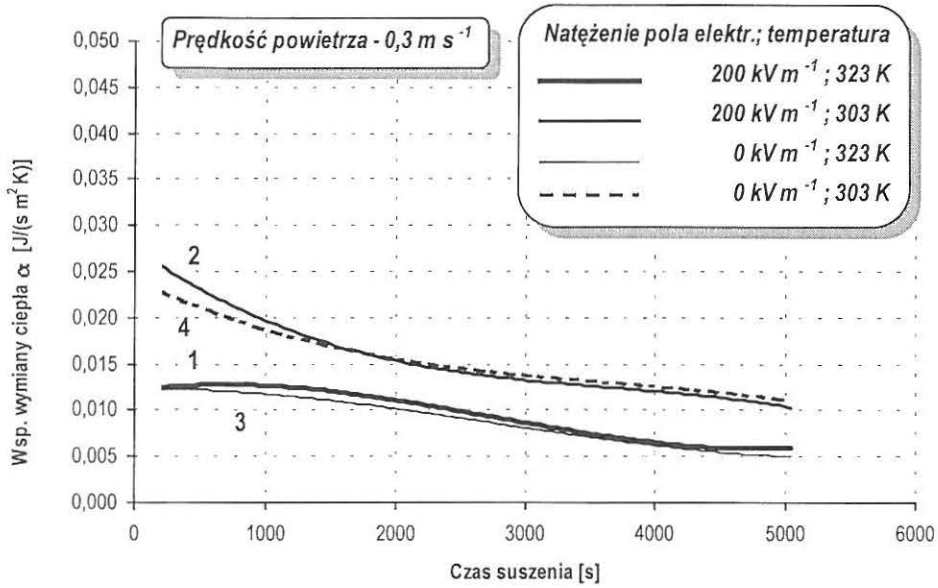
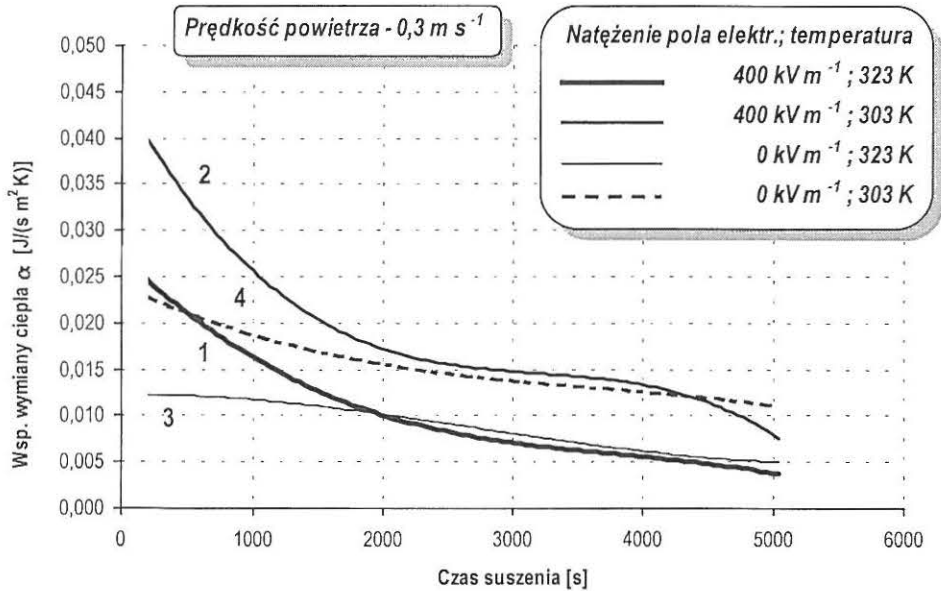
r - ciepło parowania wody, J/kg.

Na rysunkach 6.16 i 6.17 pokazano wartości współczynnika wymiany ciepła w trakcie suszenia próbek ziarna pszenicy Roma. Wykresy pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Podwyższenie temperatury powietrza powoduje zmniejszenie współczynnika wymiany ciepła (na rys. 6.16 i 6.17 krzywe 1 i 3 odpowiadają temperaturze 323 K zaś krzywe 2 i 4 temperaturze 303 K).

2. Zastosowanie pola elektrycznego z wiatrem jonowym wywołuje zwiększenie wartości współczynników wymiany ciepła (krzywa 1 i 2 na rys. 6.16 i 6.17). Efekt widoczny jest zwłaszcza przy wyższym z prezentowanych natężeń pola – 400 kV/m (rys. 6.17).

3. Zwiększenie współczynnika wymiany ciepła występuje na początku suszenia. Zjawisko uwidacznia się przy większym natężeniu pola. Efekt widać szczególnie wyraźnie przy natężeniu 400 kV/m (rys. 6.17, krzywe 1 i 2).

Rys. 6.16. Współczynnik wnikania ciepła w funkcji czasu suszenia dla natężenia pola 200 kV/m Rys. 6.17. Współczynnik wnikania ciepła w funkcji czasu suszenia dla natężenia pola 400 kV/m

Wykresy przebiegu współczynników wymiany ciepła i masy potwierdzają spostrzeżenia, które można wyciągnąć na podstawie przebiegu krzywych suszenia i uzasadniają dwa podstawowe wnioski:

1. Podwyższenie temperatury powietrza suszącego powoduje zwiększenie współczynnika wymiany masy (β_A) i zmniejszenie współczynnika wymiany ciepła (α).
2. Wyższe natężenie pola elektrycznego z wiatrem jonowym powoduje, przy dużej wilgotności suszonej próbki, zwiększenie współczynnika wymiany masy i ciepła.

7. OCENA ENERGOCHŁONNOŚCI KONWEKCYJNEJ METODY SUSZENIA ZIARNA ZBÓŻ PRZY WYKORZYSTANIU ENERGII POLA ELEKTROSTATYCZNEGO

Przebiegi krzywych suszenia z podrozdziału 6.4 (rys. 6.10 ÷ 6.13) i współczynników wymiany masy z podrozdziału 6.5 (rys. 6.14 i 6.15) wskazują jednoznacznie na możliwość przyspieszenia procesu suszenia konwekcyjnego poprzez wprowadzenie do obszaru komory suszarniczej jonizującego pola elektrycznego.

Z energetycznego punktu widzenia ważna jest energochłonność takiej metody w porównaniu z konwencjonalną metodą konwekcyjną. Porównanie to jest możliwe przy pomocy współczynnika oszczędności energii $q_{\%}$ [58].

Założenia

1. Ilość energii dostarczanej przez termowentylator próbkom w obu procesach była jednakowa.

2. Energia dostarczana przez ogrzane powietrze jest podstawowym czynnikiem powodującym usuwanie wilgoci.

3. Energia rozpraszana przez wiatr jonowy jest pomijana ze względu na to, że jej wartość jest o kilka rzędów niższa od energii wprowadzanej przez nagrzane powietrze.

Porównanie wartości energii wprowadzanych ogrzewanym powietrzem i polem elektrycznym w używanym układzie pomiarowym zostało zamieszczone w Tabeli 7.1.

Tab. 7.1. Porównanie wartości dostarczanych energii (temp. otoczenia ≈ 295 K)

Temperatura Powietrza w komorze [K]	Energia dostarczana przez wentylator [W]	Napięcie zasilacza prądu stałego [kV]	Początkowa wartość prądu ulotu [μ A]	Energia wprowadzana przez wiatr jonowy [W]
303	~ 95	2	20	0,04
308	~ 154	3	120	0,36
313	~ 454	4	380	1,52

W ogólnym przypadku można zapisać, że ilość ciepła Q potrzebna do odparowania z ciała stałego wynosi [58]:

$$Q = m \cdot r, \quad (7.1)$$

gdzie: Q - ciepło potrzebne do odparowania wody o masie m , J,

m - masa odparowywanej wody, g,

r - ciepło parowania, J/g.

Zakłada się, że w obu procesach ilość energii dostarczonej w tym samym czasie przez termowentylator była taka sama.

$$Q_1 = Q_2, \quad (7.2)$$

gdzie: Q_1 - ciepło dostarczone do usuwania wody przy braku pola elektrycznego, J,

Q_2 - ciepło dostarczone do usuwania wody w obecności pola elektrycznego, J.

Jeśli odniesiemy to ciepło do ubytków zawartości masy wody w trakcie procesu suszenia, to wyrażenia Q_1 i Q_2 przyjmą postać:

$$Q_1 = m_s(u - u_1)r_1, \quad (7.3)$$

$$Q_2 = m_s(u - u_2)r_2, \quad (7.4)$$

gdzie: m_s - masa ciała suchego, g,

u - zawartość wilgoci przed suszeniem, g H₂O /g suchej masy,

u_1 - zawartość wilgoci w próbce nie poddawanej działaniu pola elektrostatycznego w czasie suszenia, g H₂O /g suchej masy,

u_2 - zawartość wilgoci w próbce poddawanej działaniu pola elektrostatycznego w czasie suszenia, g H₂O /g suchej masy,

r_1 - jednostkowe ciepło potrzebne do odparowania jednostkowej masy wody przy suszeniu bez pola elektrycznego, J/g,

r_2 - jednostkowe ciepło potrzebne do odparowania jednostkowej masy wody przy suszeniu w obecności pola elektrycznego, J/g.

Opierając się na równaniach (7.3) i (7.4) można wyprowadzić wzór na współczynnik oszczędności energii $q_{\%}$, w którym wykonuje się porównanie jednostkowych wartości ciepła parowania wody w obu przypadkach:

$$q_{\%} = \left(\frac{r_1}{r_2} - 1 \right) \cdot 100 = \left(\frac{u - u_2}{u - u_1} - 1 \right) \cdot 100, \quad (7.5)$$

gdzie: $q_{\%}$ - współczynnik oszczędności energii, %.

Jeżeli jednostkowa wartość ciepła parowania w obu przypadkach będzie jednakowa, to współczynnik będzie miał wartość równą zeru.

Końcowych obliczeń współczynnika oszczędności energii można dokonać znając wilgotności próbek (w) lub ich zawartość wody (u). Wstawiając do wzoru (7.5), w miejsce zawartości wody u wyrażenie (7.6) [53] otrzymujemy wyrażenie (7.7).

$$u = \frac{w}{100 - w}, \quad (7.6)$$

$$q_{\%} = \left(\frac{(w - w_2) \cdot (100 - w_1)}{(w - w_1) \cdot (100 - w_2)} - 1 \right) \cdot 100, \quad (7.7)$$

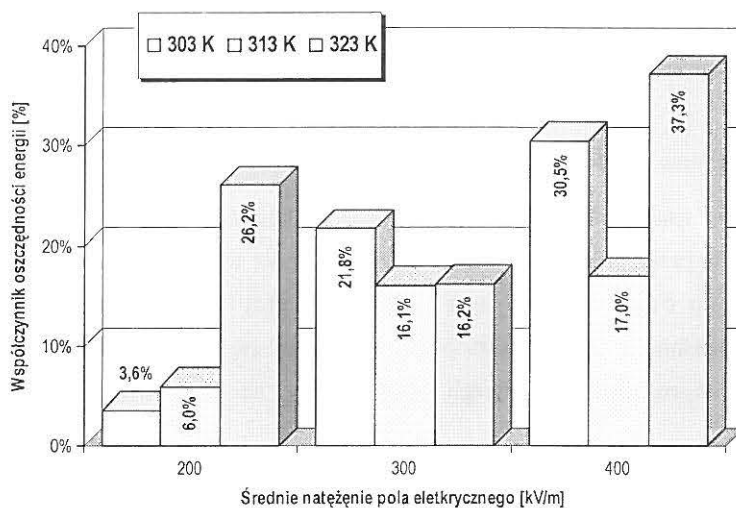
gdzie: u - zawartość wody, kg H₂O/kg s.m.,

w - wilgotność próbki ziarna przed suszeniem, %,

w_1 - wilgotność próbki ziarna po suszeniu konwekcyjnym przy braku pola elektrycznego, %,

w_2 - wilgotność próbki ziarna po suszeniu konwekcyjnym z udziałem pola elektrycznego, %.

Posługując się takim współczynnikiem wykonano obliczenia, których ilustracją jest wykres współczynnika oszczędności energii w funkcji natężenia pola (rys. 7.1).

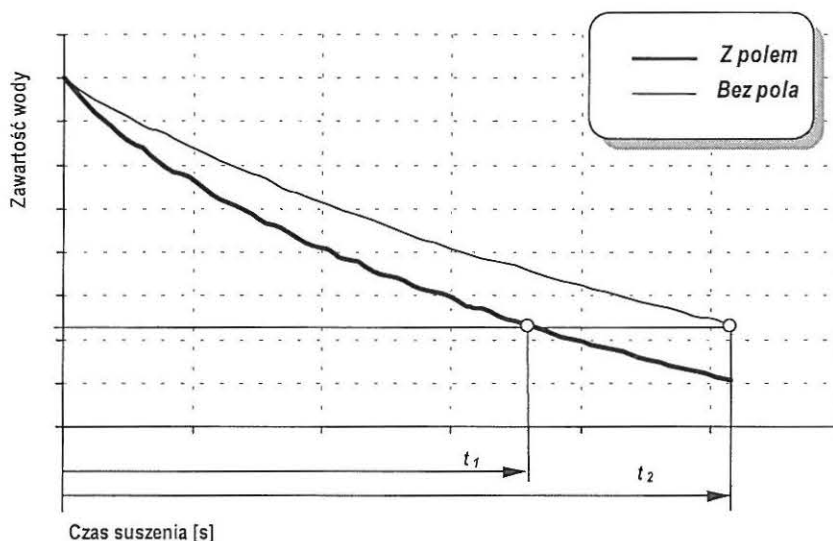


Rys. 7.1. Współczynnik oszczędności energii w funkcji stosowanego natężenia pola

Maksymalne oszczędności energii liczone na podstawie zawartości wilgoci po 90 minutach suszenia, otrzymano w przypadku maksymalnej wartości pola elektrostatycznego.

Wynosiły one odpowiednio 3,6 % przy 200 kV/m przy temperaturze 30 °C, aż do 37,3 % przy natężeniu pola 400 kV/m i temperaturze 50 °C. W przypadku temperatur 30 °C i 40 °C wraz z natężeniem pola wzrasta współczynnik oszczędności energii.

Podobne wartości współczynnika oszczędności energii można otrzymać przeprowadzając porównanie krzywych suszenia próbek (np. rys. 6.10 i rys. 7.2).



Rys. 7.2. Określanie współczynnika oszczędności energii na podstawie czasu suszenia

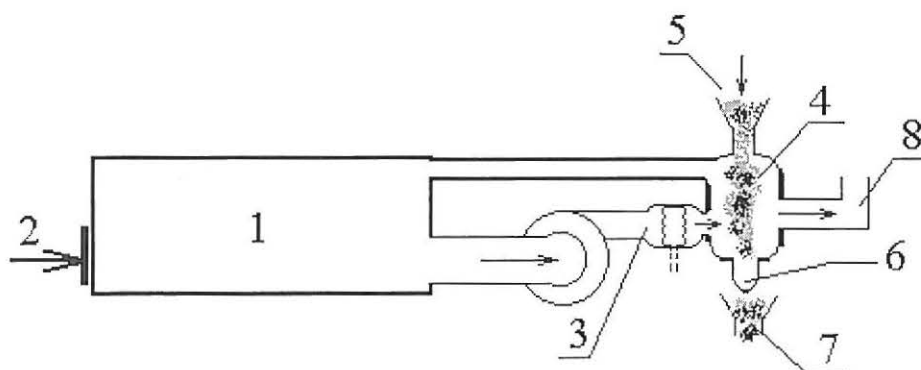
Przez porównanie różnicy pomiędzy czasami suszenia (zależność (7.8)); potrzebnym do osiągnięcia przez próbkę nie poddaną działaniu pola wymaganej wilgotności i czasem potrzebnym do osiągnięcia tej samej wilgotności przy wspomaganiu suszenia polem, z czasem suszenia t_2 przy braku pola, otrzymuje się wartości takie, jak wartości współczynnika oszczędności energii otrzymywane na podstawie zawartości wilgoci próbek.

$$q_{\%} = \frac{t_2 - t_1}{t_2} \cdot 100. \quad (7.8)$$

8. PERSPEKTYWY ROZWOJU METOD SUSZENIA ZIARNA ZBÓŻ PRZY WYKORZYSTANIU ENERGII POLA ELEKTROSTATYCZNEGO

Coraz większa wiedza na temat właściwości ziarna jest czynnikiem sprzyjającym projektowaniu aparatury suszarniczej wysokiej jakości. Znaczny wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną połączony z jej wysoką ceną oraz potrzeba uzyskiwania produktów o wysokiej jakości skłaniają do prowadzenia badań w poszukiwaniu nowych, bardziej wydajnych, energooszczędnych technologii suszenia ziaren zbóż.

Minimalizacja zużycia energii stała się jednym z głównych kryteriów przy projektowaniu współczesnych suszarek ziarna zbóż. Wśród tych technologii nastąpił znaczny rozwój w suszeniu wysoko i nisko temperaturowym, m.in.: recyrkulacja powietrza, wstępne ogrzewanie ziarna, leżakowanie ziarna, wyłączanie pewnych elementów suszarki w celu zróżnicowania temperatury suszącego powietrza każdego stopnia oraz automatyzacja suszarek. Stosowane są coraz częściej techniki suszarnicze łączące różne metody suszenia, np.: ogrzany powietrzem i z wykorzystanie mikrofal w dziedzinie częstotliwości radiowych (RF) (rys. 8.1) [34]. Stosując tą metodę w przypadku pszenicy uzyskano około połowę mniejszą energochłonność niż z zastosowaniem czystej metody suszenia dielektrycznego w dziedzinie RF.



Rys. 8.1. Metoda łączona suszenia ziaren zbóż polegająca na jednoczesnym ogrzewaniu dielektrycznym i gorącym powietrzem: 1 - generator drgań wysokiej częstotliwości, 2 - wlot strumienia powietrza, 3 - wymiennik ciepła dla uzupełniającego grzania, 4 - komora grzewcza i susząca, 5 - kosz podający, 6 - mechanizm rozładowczy, 7 - kosz ładujący, 8 - rura wylotowa [34]

Istotną zaletą grzania dielektrycznego jest to, że ciepło jest wytwarzane wewnątrz ogrzewanego ziarna, co eliminuje problem wysychania warstwy zewnętrznej a przez to tworzenia się mniej porowatej powierzchni.

Prowadzone są badania nad wykorzystaniem oddziaływania pola elektrycznego na ziarniaki zbóż, wspomagającego efekty suszenia konwekcyjnego i obniżającego energochłonność procesu suszenia. Przeprowadzone badania wskazują na istnienie określonych natężeń pola elektrycznego, dla których proces suszenia przebiega szybciej niż przy zastosowaniu tylko ogrzanego powietrza. Wydaje się możliwe stosowanie na różnych etapach suszenia różnych technologii suszenia przyspieszających proces suszenia wraz z utrzymaniem wysokiej jakości suszonego produktu, np. grzanie dielektryczne, wykorzystanie oddziaływania wiatru jonowego i ogrzanego powietrza. Ogrzewanie ziarna metodą elektryczną jest bardziej atrakcyjne, ponieważ wywiera szybszy i bardziej jednolity wpływ na poszczególne ziarna bez żadnych uszkodzeń mechanicznych. Ponadto ogrzewanie elektryczne poprawia kielkowanie. Metody wykorzystujące pole elektryczne wymagają jednak dalszych badań oraz rozwoju techniki umożliwiającej zredukowanie kosztów energii i stosowanej aparatury.

Umieszczenie suszonego ziarna zboża w polu elektrostatycznym pozwala na zmianę przebiegu suszenia konwekcyjnego. Zwiększona szybkość odparowania wody z ziarna występuje w przypadku zastosowania pola elektrostatycznego z wiatrem jonowym. Przyspieszenie usuwania wody występuje zwłaszcza w początkowym okresie suszenia przy dużej wilgotności ziarna. Wprowadzenie przyspieszonego suszenia w sytuacji, kiedy ziarno jest najwilgotniejsze może uchronić od procesów gnilnych, przy jednoczesnym skróceniu czasu suszenia i wprowadzeniu oszczędności energii potrzebnej do podgrzewania powietrza suszącego. Pewnym ograniczeniem stosowania wspomaganie suszenia polem elektrycznym jest występowanie oszczędności energii tylko przy małym przepływie powietrza.

Instalacja dodatkowej aparatury do generowania pola elektrycznego z wiatrem jonowym, w istniejących konstrukcjach suszarek, wydaje się inwestycją tanią i konstrukcyjnie prostą. Uzyskanie oszczędności energii w granicach 30 % powinno zachęcić do produkcji nowej generacji suszarek, uwzględniającej zmianę komory suszarniczej oraz do modernizacji istniejących.

9. PIŚMIENNICTWO

1. Adamkiewicz J., Pietrzyk W., Złonkiewicz Z., Ścibisz M.: *Pomiar rezystancji ziarniaków zbóż poddanych działaniu naprężeń mechanicznych*. Materiały konferencyjne V Sympozjum Naukowe AR, 255-256, Szczecin, 1993.
2. Adu B., Otten L.: *Microwave heating and mass transfer characteristics of white beans*. J. Agric. Eng. Res., 64, 71-78, 1996.
3. Anonim: Factline, p. 4, Feature, p. 13. *Grain Magazine*. The Journal of Defi Ble, No 2 February, 1998.
4. Aramowicz B., Adameczyk B., Staszewski P., Grundas S.: *Gas diffusion and absorption of stain in wheat grain with various internal structure*. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 304, 85-91, 1985.
5. Bakker-Arkema F. W.: *Selected aspects of crop processing and storage: a review*. J. Agric. Eng. Res., 30, 1-22, 1984.
6. Baran J.: *Influence of some material properties on electrostrictive effects within a dielectric model of grain*. Proc. of the 11th Congress on Agr. Eng., vol. 4, 2205-2210, Dublin, 1989.
7. Baran J.: *Elektrostatyczne efekty strykcyjne w dielektrycznej sferoidzie o strukturze warstwowej*. Praca doktorska, Politechnika Lubelska, Wydział Elektryczny, Lublin, 1990.
8. Berbert P.A., Stenning B.C.: *Analysis of density-independent equations for determination of moisture content of wheat in the radiofrequency range*. J. Agric. Eng. Res., 65, 275-286, 1996.
9. Berbert P.A., Stenning B.C.: *On-line moisture content measurement of wheat*. J. Agric. Eng. Res., 65, 287 - 296, 1996.
10. Berlage A. G., Churchill D. B., Bilsland D. M., Cooper T. M.: *Electrostatic separation to improve germination of carrot and celery seed*. Trans. ASAE, 33 (2), 597-600, 1990.
11. Brocklehurst P.A., Everst A.D.: *The size distribution of starch granules in endosperm of different sized kernels of the wheat cultivar Marris Huntsman*. J. Sci. Fd. Agric., 28, 1084-1089, 1977.
12. Brown, G.H., Hoyerler, C.N., Bierwirth, R. A.: *Theory and Application of Radio Frequency Heating*. D. Van Nostrand Co. Inc., New York, 1947.

13. Brusewitz G.H.: *Corn moisture variability during drying, mixing and storage*. J. Agric. Eng. Res., 37, 281-288, 1987.
14. Chelkowski A.: *Fizyka dielektryków*. PWN, Warszawa, 1993.
15. DiMattia D.G., Amyotte P. R., Hamdullahpur F.: *Fluidized bed drying of large particles*. Trans. ASAE, 39 (5), 1745-1750, 1996.
16. Evers A.D., Lindley J.: *The particle-size distribution on wheat endosperm grain*. J. Sci. Fd. Agric., 28, 98-102, 1977.
17. Firov O.B, Lozanskij E.D.: *Teorija iskry*. Atomizdat, Moskva, 1975.
18. Flisowski Z.: *Technika wysokich napięć*, WNT, Warszawa, 1988.
19. Frings H.: *Factors determining the effects of radio-frequency electromagnetic fields and materials they infest*. J.Econ.Entomol. 45 (3), 396-408, 1952.
20. Geodecki M.: *Endosperm cracks creation in field condition before wheat harvest*. Abstracts of the 14th ICC Congress: Quality Cereals in a Changing World. The Hague, 5-9 June 1994.
21. Gieroba J., Dreszer K., Grundas S.: *Uszkodzenia ziarna w zespołach roboczych kombajnu zbożowego*. Roczn. Nauk Roln. 76-C-4, 87-95, 1986.
22. Greenwell P., Schofield J.D.: *A starch granule protein associated with endosperm softness in wheat*. Cereal Chem. 63 (4), 379-380, 1986.
23. Grundas S.: *Niektóre aspekty podatności ziarna pszenicy zwyczajnej (*Triticum aestivum* L.) na uszkodzenia mechaniczne*. Problemy Agrofizyki, Wyd.: PAN, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, z. 54, 1987.
24. Hauser J.: *Podstawy elektrotermicznego przetwarzania energii*, Zakład Wydawniczy K. Domke, Poznań, 1996.
25. Hering M.: *Podstawy elektrotermii*, WNT, Warszawa 1992.
26. Hippel, A.: *Theory in dielectric materials and applications*, MIT Press, Cambridge, Mass. and John Wiley and Sons, Inc., New York, 1954.
27. Hnilica P., Grundas S.: *Wheat endosperm investigated as composed material*. Proc. of the 3rd International Conf. in Agric. Univ. Prague. (p. CSRS). 30, 177-189, 1995.
28. Hobler T.: *Ruch i wymienniki ciepła*, WNT, Warszawa 1968.
29. Horyński M., Pietrzyk W., Walusiak S.: *Investigations of mechanical stress influence on grain dielectric permeability changes*. XXI C.I.G.R. World Congress and AgEng'94 Conference on Agricultural Engineering, Mediolan, 1994.
30. Jones C.R., Campbell J.D.: *Micro-determination of endosperm density as a means of mapping moisture distribution in wheat grain*. Cereal Chem. 30, 177-189, 1953.

31. Kandala C.V.K., Nelson S.O., Lawrence K.C.: *Determining moisture content in small wheat samples by dual-frequency RF impedance sensing*. Trans. ASAE, 39 (3), 1185-1188, 1996.
32. Kent N.L., Evers A.D.: *Fine grading and air classification at subaleurone endosperm of high protein content*. Cereal Sci. Today. 14 (4), 142-147, 1969.
33. Klauznicer J., Pluta Z., Staniszewski S.: *Wpływ pola elektrycznego na rozwiniętą laminarną konwekcję swobodną w przestrzeni zamkniętej*. Archiwum termodynamiki i spalania, 9, 3, 453, 1978.
34. Knipper, N. V.: *Use of high-frequency currents for grain drying*. J. Agr. Engng. Res. 4 (4): 349-360. Translated from Nauch. Trud. Electrification. Selkhoz., 2, 185, 1956.
35. Koper R., Grundas S.: *Moduł Younga i absorpcja barwnika w ziarnie pszenicy o zróżnicowanej zawartości białka*. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 320, 151-157, 1987.
36. Krakowiak J., Pietrzyk, W.: *Utilization of strong electrostatic field in drying process*. 7th International Symposium on High Voltage Engineering, Dresden, 37-38, 1991.
37. Kraszewski A. W., Nelson S. O.: *Determination of moisture content and bulk density of shelled corn by measurement of microwave parameters*. J. Agric. Eng. Res., 58, 37-46, 1994.
38. Kraszewski A. W., Nelson S. O., You T. S.: *Moisture content determination in single corn kernels by microwave resonator techniques*. J. Agric. Eng. Res., 48, 77-87, 1991.
39. Krejmeric J.: *Ozone pretreatment in forage conservation and hay drying*. Proceedings of a conference held in Vilnius, Lithuanian, USSR, 1988.
40. Krejmeric J.: *The investigation of energy saving possibilities while drying grains by active ventilation*. Mechanizacija ir Elektrifikacija, Mokslo-Darbai, 23, 39-47, 1992.
41. Krejmeric J., Blazinskac V.: *Drying a thick layer of barley grain by forced ventilation using ozone*. Mechanizacija ir Elektrifikacija, Mokslo-Darbai, 21, 50-55, 1989.
42. Krejmeric J., Ziltsov B.W.: *Ozonatornaja ustanowka*. Mechanizacija i Elektrifikacija Sielskawo Choziajstwa, 3, 55-56, 1989.
43. Lawrence K. C., Nelson S. O., Kraszewski A. W.: *Temperature dependence of the dielectric properties of wheat*. Trans. of the ASAE, 33 (2), 535-540, 1990.
44. Lityński M.: *Biologiczne podstawy nasiennictwa*. PWN, 127, 1977.
45. Lykoudis P.S., Yu C.P.: *The Influence of electric forces on natural thermal convection*. J. Heat and Mass Transfer, 6, 853-862, 1963.

46. Miketinac M. J., Sokhansanj S., Tutek Z.: *Determination of heat and mass transfer coefficients in thin layer drying of grain*. Trans. ASAE, 35 (6), 1853–1858, 1992.
47. Mohsenin N. N.: *Electromagnetic radiation properties of foods and agricultural products*. Gordon and Breach Science Publishers, 1984.
48. Nelson S.: *Dielectric properties of agricultural products, measurements and applications*. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 27 (1) 845–869, 1991.
49. Nelson S.: *Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control*. Trans. ASAE, 39 (4), 1475–1484, 1996.
50. Nelson S. O.: *Density dependence of dielectric properties of particulate materials*. Trans. ASAE, 1823–1829, 1983.
51. Nelson S. O., Lawrence K. C., Kandala C. V. K.: *Comparision of RF impedance and DC conductance sensing for single-kernel moisture measurement in corn*. Trans. ASAE, 33 (2), 637–641, 1990.
52. Ozonек J.: *Laboratorium syntezy ozonu*. Wydawnictwa Uczelniane PL, Lublin, 1993.
53. Pabis S.: *Suszenie plodów rolnych*, PWRiL, 1965.
54. Pathak P.K., Agrawal Y.C., Singh B.P.N.: *Thin layer drying model for rapeseed*. Trans. ASAE, 34 (6), 2505-2508, 1991.
55. Pethig R.: *Dielectric properties of biological materials: biophysical and medical applications*. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 19 (5), 453 – 474, 1984.
56. Pietrzyk W.: *Elektrodynamiczne oddziaływanie na ziarniak jednorodnego pola elektrostatycznego*, Praca habilitacyjna, AR Lublin, 1984.
57. Pietrzyk W.: *Analiza rozkladu pola elektrycznego w dielektrycznej sferoidzie o strukturze warstwowej umieszczonej w jednorodnym polu elektrostatycznym*. Archiwum Elektrotechniki, XXXV, 2, 583-589, 1986.
58. Pietrzyk W.: *Electric field influence on grain*. Acta Agrophysica 5, Inst. Agrofizyki PAN, Lublin 1996.
59. Roggen V.A.: *An overview of dielectric measurements*. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 25 (1), 95–106, 1990.
60. Sadek S.E., Fax R. G., Hurwitz M.: *The influence of electric fields on convective heat and mass transfer from a horizontal surface under forced convection*. Trans. ASME, 144-148, 1972.
61. Senftleben H.: *Die Einwirkung elektrischer und magnetischer Felder auf Wärmeleitvermögen von Gasen*. Phys. Zeitschr., 32, 550, 1931.

62. Senftleben H., Braun W.: *Der Einfluss elektrischer Felder auf den Wärmestrom in Gasen*, Z. Phys., 102, 480-556, 1936.
63. Strona I.G.: *Trawmirowanije siemian i jewo prieduprieżdzenie*. Izd. Kołos. Moskwa, 1972.
64. Stuetzer O.M.: *Ion Drag Pressure Generation*. Journal of Applied Physics, 30, 984, 1959.
65. Szot B., Grundas S.: *Zastosowanie zestawu pomiarowego do dokładnego określania wymiarów ziarna zbóż*. Biul. IHAR, 1 (18), 103-112, 1973.
66. Taruszkina W.I.: *Distribution of ponderomotive forces on grains during separation (in Russian)*. M.i E.S.Ch., 12, 35-39, 1983.
67. Thomas, A. M.: *Pest control by high-frequency electric fields. Critical resume*. Tech. Rep. W/T23. Leatherhead, Surrey, England: British Electric and Allied Industries Assoc., 1952.
68. Wert Ch.A., Thomson R.M.: *Fizyka ciała stałego*. PWN, Warszawa, 1974.
69. Wolny A.: *Wpływ pola elektrycznego na suszenie powierzchni cylindrycznej*. Materiały VII Sympozjum Suszarnictwa, Politechnika Łódzka, II, 241, 1991.
70. Wolny A., Kaniuk R.: *Odparowanie z powierzchni płaskiej i cylindrycznej w polu elektrycznym*. XV Ogólnopolska Konferencja Naukowa Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Gdańsk, 139-144, 1995.
71. Woźniak w., Grundas S.: *Wpływ nawilżania ziarna pszenicy na jego wytrzymałość mechaniczną*. Biuletyn IA PAN, Nr1, w Lublinie, Przegl. Zboż.-Młyn. 26-28. 1998.

10. SUMMARY

THE INFLUENCE OF ELECTROSTATIC FIELD AND OZONE ON GRAIN DRYING PROCESSES

The issue of the electric field influence on organisms and products of biological origin is hardly examined. Recently, the ecologists have paid a lot more attention to the harm that electromagnetic fields can cause.

Technological possibilities of the application of electric fields in agricultural production and food industry have been neglected so far. This results in gaps in the basic research on such problems as, for example, the electric field influence on physical properties of biological materials.

To fill this gap, the presented publication describes the influence of electric field on resistance and electric permittivity in grain – the basic measureable physical properties of biological materials. Some frequently changing electric fields is also described in the aspect of application in drying processes.

Moreover, the state of art in the research on the application of ionic wind, ozone and striction forces in convective drying processes.

Chapter 6 presents the laboratory system and test results related to:

- convective drying of wheat grain at the presence of a uniform electric field,
- convective drying of wheat grain at the presence of a uniform electric field and ozone-air mixture,
- convective drying of wheat grain at the presence of a uniform electric field and ionic wind.

In some selected cases the coefficients of heat and mass transfer have been determined.

The effectiveness of proposed changes in convective drying processes, i.e.; the introduction of electric field and ionic wind is presented in the form of energy consumption factors.

The work is completed with the perspectives and trends in the use of electric filed energy to modernise known grain drying processes.

Keywords: convective drying, electric forces, energy saving.