

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

**ACTA AGROPHYSICA**

**40**

**Marek Horyński**

**WPŁYW POLA ELEKTROSTATYCZNEGO  
NA WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNE ZBÓŻ**

Monografia

Lublin 2001

### **Komitet redakcyjny**

Redaktor Naczelny - prof. dr hab. Jan Gliński, czł. koresp. PAN

#### **Z-cy Redaktora Naczelnego:**

prof. dr hab. Ryszard T. Walczak, czł. koresp. PAN - fizyka środowiska

prof. dr hab. Bogusław Szot - fizyka materiałów roślinnych

prof. dr hab. Ryszard Dębicki - gleboznawstwo

#### **Redaktor tomu:**

Dr inż. Marek Horyński

### **Opiniował do druku**

Prof. dr hab. inż. Wiktor Pietrzyk

### **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, e-mail: fundacja@demeter.ipan.lublin.pl

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 z Programu Leonardo da Vinci, projekt Nr 09112/99.  
Sekretariat Generalny Komisji Wspólnoty Europejskiej DG XII nie przyjmuje  
odpowiedzialności za treści zawarte w niniejszej publikacji.

This publication is supported from Leonardo da Vinci grant No 09112/99.  
European Commission General Directorate DG XXII does not take responsibility  
for the content of this publication.

© Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 2001

ISBN 83-87385-53-0

ISSN 1234-4125

Wydanie I. Nakład 150 egz. Ark. wyd. 11,0

Skład komputerowy: Irena Kulawiak

Druk: Zakład Usług Poligraficznych TEKST s.c., ul. Wspólna 19, 20-344 Lublin

## SPIS TREŚCI

Przedmowa do serii wydawniczej Leonardo da Vinci	7
Preface for Leonardo da Vinci editorial series	8
SPIS SYMBOLI	9
1. WSTĘP	11
2. PRZEGLĄD LITERATURY	12
3. CEL I ZAKRES ROZWAŻAŃ	16
4. CHARAKTERYSTYKA BADANEGO MEDIUM	18
5. BUDOWA I WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNO - ELEKTRYCZNE ZIARNIAKÓW ZBÓŻ	19
5.1. Budowa ziarniaka	19
5.2. Właściwości elektryczne ziarniaków	21
5.2.1. Rezystancja ziarniaków	22
5.2.2. Przenikalność elektryczna ziarniaków	24
5.2.3. Tangens kąta stratności ziarniaków	26
6. BADANIA LABORATORYJNE	27
6.1. Opis techniczny stosowanej aparatury	27
6.2. Pomiar przenikalności elektrycznej nasion zbóż w funkcji naprężeń mechanicznych	30
6.2.1. Opis stanowiska do pomiaru przenikalności elektrycznej nasion zbóż w funkcji naprężeń mechanicznych	30
6.2.2. Metodyka pomiaru przenikalności elektrycznej nasion zbóż w funkcji naprężeń mechanicznych	31
6.2.3. Wyniki pomiarów przenikalności elektrycznej nasion zbóż w funkcji naprężeń mechanicznych	33
6.2.3.1. Wyniki pomiarów przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia w funkcji naprężeń mechanicznych	33
6.2.3.2. Wyniki pomiarów przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy w funkcji naprężeń mechanicznych	37
6.2.3.3. Wyniki pomiarów przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta w funkcji naprężeń mechanicznych	40
6.2.4. Analiza wyników badań przenikalności elektrycznej ziarnia- ków w funkcji naprężeń mechanicznych	44
6.2.5. Określanie korelacji pomiędzy gatunkami nasion i wpływem ciśnienia na ich przenikalność elektryczną	48

6.2.6. Wnioski z badań przenikalności elektrycznej ziarniaków w funkcji naprężeń mechanicznych	66
6.3. Pomiar rezystancji nasion zbóż w funkcji naprężeń mechanicznych	68
6.3.1. Opis stanowiska do pomiaru rezystancji nasion zbóż w funkcji naprężeń mechanicznych	68
6.3.2. Metodyka pomiaru rezystancji ziarniaków w funkcji naprężeń mechanicznych	69
6.3.3. Wyniki pomiarów rezystancji ziarniaków w funkcji naprężeń mechanicznych	70
6.3.4. Wnioski z badań rezystancji ziarniaków w funkcji naprężeń mechanicznych	72
6.4. Pomiar przenikalności elektrycznej nasion zbóż w funkcji natężenia pola elektrostatycznego	73
6.4.1. Opis stanowiska do pomiaru przenikalności elektrycznej nasion zbóż w funkcji natężenia pola elektrostatycznego	73
6.4.2. Metodyka pomiaru przenikalności elektrycznej nasion zbóż w funkcji natężenia pola elektrostatycznego	74
6.4.3. Wyniki pomiarów przenikalności elektrycznej nasion zbóż w funkcji natężenia pola elektrostatycznego	75
6.4.3.1. Wyniki pomiarów przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia w funkcji natężenia pola elektrostatycznego	76
6.4.3.2. Wyniki pomiarów przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy w funkcji natężenia pola elektrostatycznego	80
6.4.3.3. Wyniki pomiarów przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta w funkcji natężenia pola elektrostatycznego	84
6.4.4. Analiza wyników badań przenikalności elektrycznej ziarniaków w funkcji natężenia pola elektrostatycznego	88
6.4.5. Określanie korelacji pomiędzy gatunkami nasion i wpływem natężenia pola elektrostatycznego na ich przenikalność elektryczną	94
6.4.6. Wnioski z badań przenikalności elektrycznej ziarniaków w funkcji natężenia pola elektrostatycznego	97
6.5. Zależność rezystancji ziarna zbóż od natężenia pola elektrostatycznego	100
6.5.1. Opis stanowiska do pomiaru rezystancji nasion zbóż w funkcji natężenia pola elektrostatycznego	100

6.5.2. Metodyka pomiaru rezystancji ziarniaków w funkcji natężenia pola elektrostatycznego	101
6.5.3. Wyniki pomiarów rezystancji ziarniaków w funkcji natężenia pola elektrostatycznego	101
6.5.4. Wnioski z badań rezystancji ziarniaków w funkcji natężenia pola elektrostatycznego	102
7. WPLYW SFERYCZNOŚCI CZĄSTEK DIELEKTRYCZNYCH NA PRZENIKALNOŚĆ ELEKTRYCZNĄ MIESZANINY DIELEKTRYK-POWIETRZE	103
8. ANALIZA PORÓWNAWCZA	108
8.1. Określanie wpływu ciśnienia oraz natężenia pola elektrostatycznego na przenikalność elektryczną ziarniaków	108
8.2. Relacje między przenikalnością elektryczną mieszaniny ziarniaki - powietrze a przenikalnością ziarniaków	120
8.3. Wpływ wilgotności na zmianę przenikalności elektrycznej mieszaniny ziarniaki - powietrze przy stałej wartości ciśnienia	131
8.4. Wpływ wilgotności na zmianę przenikalności elektrycznej mieszaniny ziarniaki - powietrze przy stałej wartości natężenia pola elektrostatycznego	133
9. SYNTETYCZNA OCENA UZYSKANYCH WYNIKÓW	136
10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	138
11. PIŚMIENNICTWO	139
12. STRESZCZENIE	146
13. SUMMARY	147

## Przedmowa do serii wydawniczej Leonardo da Vinci

Istotnym sektorem gospodarki regionu środkowo-wschodniej Polski jest sektor agro-spożywczy i związany z nim przemysł przetwórstwa rolniczego. Dlatego wiele działań naukowych i edukacyjnych związanych z zagadnieniami znajdującymi zastosowanie w tych dziedzinach jest podejmowanych w takich ośrodkach akademickich: jak Politechnika Lubelska oraz Instytut Agrofizyki PAN w Lublinie.

Znaczna liczba ich absolwentów znajduje zatrudnienie w zakładach przemysłowych tego regionu zarówno, m.in. u partnerów w projekcie Leonardo da Vinci jakimi są Elektromontaż Lublin S.A. oraz PZL Świdnik S.A., zakładach przetwórstwa rolnego oraz w jednostkach badawczo-rozwojowych wielu instytucji. Wielu absolwentów posiadających wykształcenie w zakresie elektrotechniki współuczestniczy często w realizacji zadań badawczych, projektowych i produkcyjnych ukierunkowanych na potrzeby regionu. Poszczególne pozycje serii wydawniczej mają na celu nie tylko prezentację wyników badań, ale także mają stanowić materiał źródłowy dla inżynierów elektryków zatrudnionych w regionie i zawodowo zainteresowanych tą tematyką. Natomiast, dla uczących się na poziomie akademickiego kształcenia zawodowego w dziedzinie elektrotechniki, wydawnictwa te mogą stanowić przykład opisu praktycznej realizacji procesu rozwiązywania trudnych problemów w szeroko rozumianej dziedzinie zastosowań elektrotechniki w wybranych przez twórców projektu zagadnieniach.

W skład serii wydawniczej wchodzi następujące tytuły:

1. Horyński M.: *Wpływ pola elektrostatycznego na właściwości elektryczne ziarna zbóż.*
2. Horyński M., Oleszek M.: *Praktyki zawodowe studentów Wydziału Elektrycznego Politechniki Lubelskiej w Elektromontaż S.A. w Lublinie.*
3. Pietrzyk W.: *Modele ziarniaków zbóż stosowane w analizie elektrodynamicznej i termodynamicznej.*
4. Pietrzyk W. i inni: *Urządzenia bifilarne do odpylania w przemyśle rolno-spożywczym.*
5. Sumorek A.: *Wpływ pola elektrostatycznego na konwekcyjne suszenia ziarna zbóż.*
6. Walusiak S., Krygier A.: *Praktyki zawodowe studentów wydziału Elektrycznego Politechniki Lubelskiej w PZL Świdnik.*
7. Wójcicka-Migasiuk D.: *Zastosowanie metody potencjałów węzłowych do analizy i projektowania instalacji słonecznych ciepłej wody.*

## Preface for Leonardo da Vinci editorial series

Agri - food production and processing industry is most important sector in the central - eastern region of Poland. That is why many educational and scientific activities related to the problems applied in these sectors of industry is taken up in such academic centers as Lublin Technical University and Institute of Agrophysics Polish Science Academy in Lublin.

Many graduates from the regional tertiary vocational education institutes are employed also at Leonardo da Vinci project partners i.e.: Elektromontaż Lublin S.A. and PZL Świdnik S.A, in food processing companies and in Research & Development Units in many institutes and companies. Many graduates educated in electrical engineering often co-operate in realisation of research, design and production tasks directed towards the local needs.

Particular items in this editorial series are aimed not only at the presentation of test results but also can form the reference basis for electric engineers employed in the region who are professionally interested in this field. Nevertheless, students at the level of tertiary vocational training in electrical engineering can take advantage from the described examples of practical processes of solution to difficult problems in widely understood field of electrical engineering applications in areas selected by the authors of this project entitled "*Forging development in the system of students' practical training in electrical engineering sector in the aspect of qualification needs*".

Leonardo da Vinci editorial series contains the following titles (in Polish):

1. Horyński M.: *The influence of electrostatic field on electric properties of grain.*
2. Horyński M., Oleszek M.: *Vocational practical training for students from the Faculty of Electrical Engineering, Lublin Technical University at Elektromontaż S.A. in Lublin.*
3. Pietrzyk W.: *Grain models in electrodynamic and thermal dynamic analyses.*
4. Pietrzyk W. et al.: *Bifilar devices to dust control in agri-food industry.*
5. Sumorek A.: *The influence of electrostatic field on convective drying of grain.*
6. Walusiak S., Krygier A.: *Vocational practical training for students from the Faculty of Electrical Engineering, Lublin Technical University at PZL Świdnik.*
7. Wójcicka-Migasiuk D.: *The application of node potential method for the analysis and design of solar hot water systems.*

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- a - ogniskowa sferoidy
- b - krótsza półoś sferoidy
- c - dłuższa półoś sferoidy
- $A_1, A_2$  - współczynniki nachylenia
- $B_W$  - współczynnik sferyczności sferoidy
- $C_W$  - względna grubość warstwy
- C - pojemność
- Cov - kowariancja
- D - wektor indukcji elektrycznej
- E - wektor natężenia pola elektrycznego
- j, k, m, n - liczby całkowite
- d - średnica ziarniaka
- l - długość ziarniaka
- f - częstotliwość
- E - współczynnik sprężystości podłużnej
- $\epsilon$  - przenikalność elektryczna ziarniaka (przenikalność względna)
- $\Delta\epsilon$  - zmiana przenikalności elektrycznej ziarniaka
- $\epsilon_0$  - przenikalność elektryczna próżni ( $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ )
- $\epsilon'$  - składowa rzeczywista względnej przenikalności elektrycznej ziarniaka
- $\epsilon''$  - składowa urojona względnej przenikalności elektrycznej ziarniaka
- $\delta$  - odchylenie standardowe
- $\lambda(\epsilon)$  - funkcja określająca zmianę  $\epsilon$  przy odkształceniach
- $\tau$  - gęstość ośrodka
- $\rho$  - współczynnik korelacji
- R - rezystancja ziarniaka
- $\text{tg}\delta$  - tangens kąta stratności ziarniaka
- T - temperatura
- U - napięcie
- V - objętość ziarniaka
- w - wilgotność ziarniaka
- x - współczynnik koncentracji powietrza



## 1. WSTĘP

W produkcji rolniczej od lat znaczące miejsce stanowią uprawy roślinne. Jedną z głównych grup upraw roślinnych stanowią zboża. Należą one do rodziny traw (*Gramineae*). Rodzina ta jest bardzo liczna, na całym świecie obejmuje około 700 rodzajów i około 8000 gatunków. Współczesne rolnictwo wymaga aby produkowane odmiany wydawały odpowiednio wysokie plony. Z faktem tym wiąże się zagadnienie racjonalnego zbioru plonów, właściwego ich zabezpieczenia przed szkodnikami, odpowiednich warunków przechowywania, a następnie przetwarzania [22]. Istotny staje się tutaj problem poznania właściwości fizyko - chemicznych poszczególnych gatunków nasion, a obecnie w związku z coraz szerszym zastosowaniem energii elektrycznej w rolnictwie, ich właściwości elektrycznych. Wśród sposobów bezpośredniego wykorzystania tej energii można wyróżnić, np.: sortowanie i suszenie nasion, ochrona przed szkodnikami (dezynsekcja), przetwarzanie nasion poprzez grzanie mikrofalowe i w zakresie częstotliwości radiowych [66], pasteryzacja przetworów owocowych, dielektryczne suszenie drewna, elektrodowe ogrzewanie wody oraz elektrostatyczne odpylanie w młynach i mieszalnicach materiałów pylistych oraz wiele innych.

Praca ta jest kontynuacją badań prowadzonych w Zakładzie Elektrotechniki i Elektryfikacji Rolnictwa Akademii Rolniczej w Lublinie, a następnie w Katedrze Elektrotechniki Ogólnej Politechniki Lubelskiej nad oddziaływaniem pola elektrostatycznego na ziarniaki zbóż i możliwościami wykorzystania tego oddziaływania do obniżenia energochłonności w procesie suszenia [105-107].

Przenikalność elektryczna ziarniaków  $\epsilon$  oraz jej zmiany w funkcji gęstości  $\frac{\partial \epsilon}{\partial \tau}$  mają istotne znaczenie przy powstawaniu sił elektrostrykcyjnych. O wielkości sił elektrostrykcyjnych decyduje zależność  $\epsilon$  od odkształceń wywołujących lokalne zmiany gęstości dielektryka oraz niejednorodność rozkładu pola [8,9,98]. Do tej pory brak badań określających jednoznacznie wpływ sił elektrostrykcyjnych na energochłonność suszenia ziarniaków zbóż. W dotychczasowych pojedynczych pracach uzyskano obniżenie energochłonności w procesie suszenia ziarniaków dla pewnych wartości natężenia pola elektrostatycznego oraz przy różnych wilgotnościach dla odmiennych gatunków nasion [105-107]. Fakty te skłoniły do podjęcia badań nad wpływem pola elektrostatycznego oraz naprężeń mechanicznych na przenikalność elektryczną ziarniaków, z uwagi na jej związek z powstawaniem sił elektrostrykcyjnych.

## 2. PRZEGLĄD LITERATURY

Ziarniaki zbóż należą do najczęściej badanych materiałów roślinnych. Wśród dotychczas przeprowadzonych badań przeważały pomiary ich właściwości fizyko - chemicznych. W ostatnich latach w związku z rozwojem techniki i coraz szerszym zastosowaniem energii elektrycznej, badane są również ich właściwości elektryczne (rezystancja, przenikalność elektryczna, tangens kąta stratności i inne). Pierwszą publikacją, która objęła jednocześnie wyniki badań teoretycznych i laboratoryjnych oraz zawierała wskazówki dotyczące projektowania elektrostatycznych maszyn sortująco-czyszczących jest praca zbiorowa pod red. Basowa - "Elektrozierno-oczistitielnyje masziny" [10]. Zagadnieniem separacji zajmowali się również: Izakov, Dmitriew [44], Zawjackas [105] oraz Bei i Wang [11].

Szmigieli i Jusubalijew [97] stwierdzili, że dla właściwego określenia parametrów pracy elektrycznych urządzeń separacyjnych celowe jest określenie wpływu jaki wywiera pole elektryczne na wewnętrzną strukturę ziarniaka. W celu eksperymentalnego zbadania natężenia pola wewnątrz ziarniaka sporządzili elektrolityczny model w formie trójwarstwowej elipsoidy, którego wymiary stanowiły pięćdziesięciokrotne średnie statystyczne wymiary ziarniaka. Podstawowym mankamentem przeprowadzonej przez nich analizy pola wewnątrz ziarniaka jest przyjęcie jednorodnej struktury elipsoidy, gdy w rzeczywistości ziarniak oraz sporządzony elektrolityczny model ma strukturę warstwową. Uproszczony do tego stopnia model ziarna uniemożliwia np.: analizę działających w jego wnętrzu sił elektrostrykcyjnych.

Nowe formuły analityczne umożliwiające obliczenie natężenia pola w dowolnym obszarze warstwowego modelu ziarniaka przedstawił Pietrzyk [83,84]. Zbadał on również wpływ warstwowej struktury ziarniaka na kształtowanie się wartości momentu orientacji ziarniaka w polu elektrostatycznym co jest niezwykle istotne przy sortowaniu nasion. Znajomość momentu orientacji ziarniaka umożliwia również pomiar przenikalności elektrycznej pojedynczego ziarniaka. Opracowana przez niego udoskonalona wersja metody Szmigiela umożliwiła pomiar przenikalności elektrycznej dielektryków oraz pojedynczych ziarniaków czterech podstawowych zbóż z dokładnością nie przekraczającą 4%. Zastosowany do obliczeń model składający się z dwóch warstw umożliwił otrzymanie stosunkowo prostych zależności analitycznych, pozwalających na analizę wpływu: wilgotności, kształtu, grubości warstw i ich przenikalności na moment orientacji [84-86].

Przeprowadzone przez Nelsona [67,70,71,76] badania pozwoliły na opracowanie modeli różnych gatunków zbóż, które umożliwiły przybliżone

określenie przenikalności elektrycznej ziarniaków w funkcji wilgotności i temperatury. Modele te opierają się na liniowej zależności między pierwiastkiem kwadratowym i sześciennym z przenikalności elektrycznej a gęstością ziarniaka:

$$(\varepsilon)^{1/2} = 1 + A_1 \tau, \quad (1)$$

$$(\varepsilon)^{1/3} = 1 + A_2 \tau, \quad (2)$$

gdzie:  $A_1, A_2$  - współczynniki nachylenia,  $\tau$  - gęstość ziarniaka,  $\varepsilon$  - przenikalność elektryczna ziarniaka.

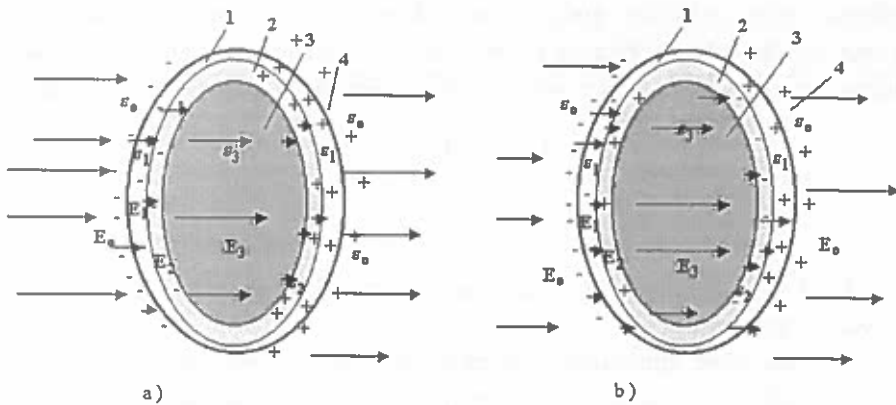
Na ziarniaki zbóż umieszczone w polu elektrycznym mogą działać dwa rodzaje sił: siły ponderomotoryczne i siły elektrostrykcyjne. Ziarniaki należą do słabo polaryzowalnych dielektryków, które mogą spełniać równanie Clausiusa - Mosottiego. Równanie to wyraża w jawnej postaci zależność przenikalności elektrycznej środowiska od jego gęstości. Jeśli zmienia się gęstość np. pod wpływem sił wywieranych na dielektryk, to zmienia się również przenikalność. Siły zmieniające gęstość dielektryka mogą być również wywołane przez naprężenia mechaniczne wymuszone zewnętrznym polem elektrycznym [57,99]. Zmiana gęstości, zazwyczaj lokalna, może powodować również lokalne zmiany przenikalności, przekształcając dielektryk jednorodny w niejednorodny. 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 [73]. 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 [52].

Na możliwość wykorzystania elektrodynamicznego oddziaływania pola elektrycznego na wewnętrzną strukturę ziarniaka wskazał Taruśkin [99]. W 1983 r. podał on hipotezę, że pole elektrostatyczne może wywołać w ziarniaku mikrozmiiany objawiające się w zmniejszeniu zdolności do zatrzymywania wilgoci.

Rysunek 1 przedstawia fizyczny, warstwowy model ziarniaka oraz hipotetyczny obraz pola elektrycznego w jego wnętrzu w postaci linii sił pola [99].

W warunkach naturalnych warstwy ziarniaków mają większą wilgotność i przenikalność elektryczną niż zewnętrzne. Jeżeli założymy, że liczba słoików wynosi  $m$  i ponumerujemy je kolejno od zewnętrznych do wewnętrznych, to można zapisać:

$$\varepsilon_0 < \varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \dots < \varepsilon_m \quad (3)$$



Rys. 1. Hipotetyczny obraz pola w ziarniaku i w jego sąsiedztwie przy: a)  $\epsilon_0 < \epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3$ , b)  $\epsilon_0 < \epsilon_1 < \epsilon_2 > \epsilon_3$  (1,2,3 - warstwy ziarniaka, 4 - środowisko otaczające ziarniak) [99].

Fig. 1. Theoretical field distribution in a seed and in its surrounding at a)  $\epsilon_0 < \epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3$ , b)  $\epsilon_0 < \epsilon_1 < \epsilon_2 > \epsilon_3$  (1,2,3 - grain layers, 4 - grain environment) [99].

gdzie:  $\epsilon_0$  - przenikalność elektryczna otoczenia (powietrza),  $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_m$  - przenikalność elektryczna warstw ziarniaka.

Jeżeli umieścimy ziarniak w polu elektrostatycznym, to przy przejściu od słoja do słoja zachowana pozostaje składowa normalna wektora indukcji elektrycznej:

$$\overline{D} = \epsilon_0 \overline{E}_0 = \epsilon_1 \overline{E}_1 = \epsilon_2 \overline{E}_2 = \dots = \epsilon_m \overline{E}_m, \quad (4)$$

gdzie:  $E_0, E_1, E_2, \dots, E_m$  - natężenie pola elektrostatycznego otoczenia i wewnątrz ziarniaka.

Z równań (2.3) i (2.4) wynika:

$$E_0 > E_1 > E_2 \dots > E_m. \quad (5)$$

W następstwie tego na zewnątrz ziarniaka i na granicach jego warstw powstają ładunki o różnej gęstości powierzchniowej. W rezultacie wzajemnego oddziaływania ładunków wewnątrz ziarniaka, jego warstwy są ściskane, rozciągane lub zginane. Może to spowodować przyspieszenie ubytku wilgoci z ziarniaka w czasie suszenia w obecności pola elektrycznego. Według Taruškina [99] pod wpływem pola elektrycznego powstają w ziarniaku naprężenia mechaniczne, które wywołują mikrozmiany w strukturze ziarniaka. Zmiany te mogą objawiać się następnie przez obniżenie zdolności utrzymywania wilgoci i obniżenie energochłonności w procesie suszenia.

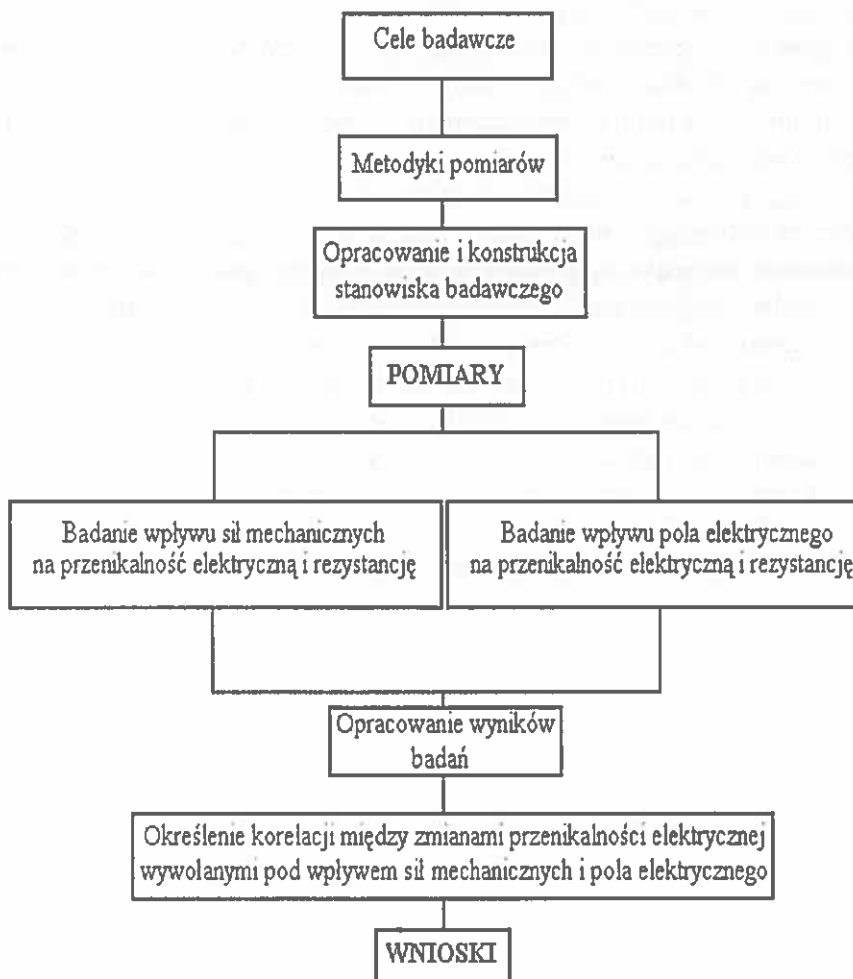
Zagadnieniem wykorzystania mechanicznych efektów oddziaływania pola elektrostatycznego do obniżenia energochłonności suszenia konwekcyjnego zajmował się Baran [9,90,91]. Przeprowadzone przez niego badania nie potwierdziły hipotezy Taruškina [99]. Suszarki bębnowej wykorzystującej efekt oddziaływania pola elektrycznego podczas suszenia użył w swoich badaniach zespół pod kierunkiem Pietrzyka. Otrzymane wyniki wskazują na istnienie dla poszczególnych gatunków nasion wartości natężeń pola elektrostatycznego, dla których możliwe jest obniżenie energochłonności procesu suszenia [29,34,55,106,107,108]. Przeprowadzono badania ziarniaków: jęczmienia, owsa i żyta.

Znajomość właściwości elektrycznych ziarniaków zbóż jest jeszcze niedostateczna. Wynika to między innymi z trudności metodycznych związanych ze zbyt małymi wymiarami geometrycznymi i zróżnicowanym kształtem obiektu, brakiem powtarzalności cech fizycznych, itp.

Na zagadnienia oddziaływania pola elektrostatycznego na dielektryki pochodzenia roślinnego i na potencjalną możliwość wykorzystania efektów tego oddziaływania, zwracało uwagę wielu autorów. Zostały opracowane modele, dzięki którym możliwe okazało się określenie rozkładu pola i sił jakim podlega cząstka w rozpatrywanym układzie. Przeprowadzone badania suszenia ziarniaków: jęczmienia, owsa i żyta nie dały jednoznacznych efektów, ale nie obaliły postawionej hipotezy. Stwierdzono bowiem, że istnieją różnice w ubytku wilgoci z ziarniaków zbóż w zależności od gatunku i od wartości przyłożonego pola. Uzyskano obniżenie energochłonności suszenia przy różnych wartościach natężenia pola elektrostatycznego dla różnych gatunków zbóż. Badania te sugerują celowość dalszej kontynuacji badań związanych z tym zjawiskiem.

### 3. CEL I ZAKRES ROZWAŻAŃ

Zasadniczym celem pracy jest zbadanie i opisanie zagadnienia wpływu zmiany pola elektrycznego i sił mechanicznych na zmianę przenikalności elektrycznej ziarniaków zbóż jako dielektryków o strukturze niejednorodnej. Dzięki opracowaniu tego zagadnienia możliwe będzie uzasadnienie rozwoju i stosowania metod suszenia dielektryków niejednorodnych pochodzenia organicznego ze wspomagającym działaniem pola elektrostatycznego.



Rys. 2. Schemat blokowy zakresu badań.

Fig. 2. Test flow chart.

W niniejszej pracy zbadano i przeanalizowano wpływ natężenia pola elektrostatycznego i naprężeń mechanicznych na przenikalność elektryczną i rezystancję ziarniaków zbóż. Zagadnienie te zbadano w oparciu o metodykę postępowania określoną w punktach 1 ÷ 3:

1. Określenie wpływu sił mechanicznych na przenikalność elektryczną i rezystancję nasion zbóż.
2. Określenie wpływu natężenia pola elektrostatycznego na przenikalność elektryczną i rezystancję ziarniaków.
3. Określenie korelacji między naprężeniami wywołanymi siłami zewnętrznymi i polem elektrostatycznym (siłami strykcyjnymi).

Dodatkowym zadaniem jest określenie, na podstawie własnych badań laboratoryjnych i znanych z literatury opracowań teoretycznych, charakteru sił strykcyjnych.

Schemat blokowy zakresu badań ilustruje Rys. 2.

#### 4. CHARAKTERYSTYKA BADANEGO MEDIUM

Jako przykład dielektryka o strukturze niejednorodnej wykorzystano do badań ziarniaki zbóż. 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. Badane medium charakteryzuje się budową niejednorodną. Sposób prowadzenia pomiaru narzucał losowe usytuowanie ziarniaków w kondensatorach pomiarowych. Nasiona zbóż, m.in.: jęczmienia, pszenicy, żyta i owsa różnią się kształtem, wymiarami geometrycznymi oraz składem chemicznym i gęstością. W obrębie jednego gatunku występują również różnice w rozmiarach ziarniaków). Pod względem geometrycznym, ziarniaki czterech podstawowych zbóż stanowią obiekty o kształtach zbliżonych do kształtu elipsoidy, której przekrój poprzeczny jest kardiodą. 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 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 [44,64]. W celu wyeliminowania zróżnicowania w wielkości nasion w ramach każdego gatunku przeprowadzono ich selekcję.

Zc względu na wymiary geometryczne ziarniaki opisano następującymi parametrami: długość ( $l$ ), średnica ( $d$ ), współczynnik sferyczności  $B_w = d/l$ .

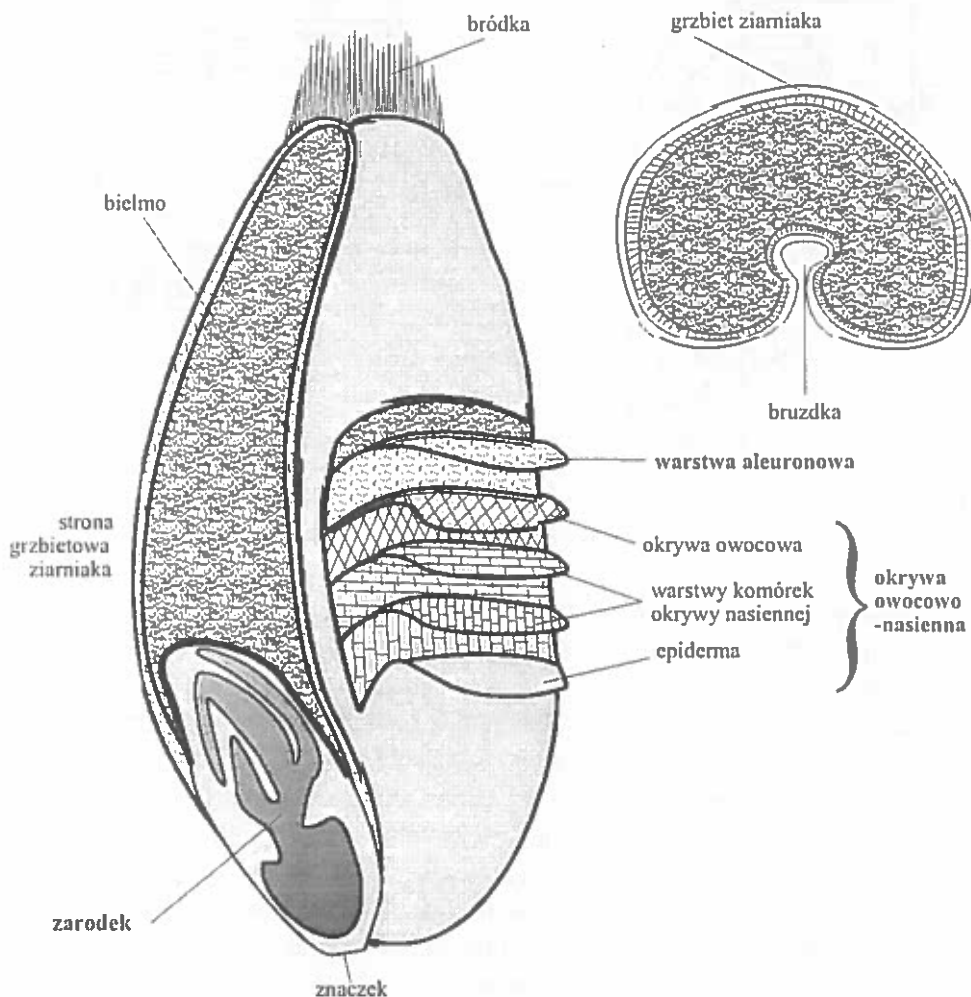
Do badań wykorzystano ziarna jęczmienia o średnich wymiarach: długość  $l \approx 8.2$  mm, średnica  $d \approx 3.1$  mm, współczynnik sferyczności  $B_w = d/l \approx 0.38$ , ziarna pszenicy jarej o wymiarach: długość  $l \approx 5$  mm, średnica  $d \approx 2,8$  mm, współczynnik sferyczności  $B_w = d/l \approx 0,56$ , ziarna żyta o średnich wymiarach: długość  $l \approx 7,3$  mm, średnica  $d \approx 2,7$  mm, współczynnik sferyczności  $B_w = d/l \approx 0.37$ .



## 5. BUDOWA I WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNO-ELEKTRYCZNE ZIARNIAKÓW ZBÓŻ

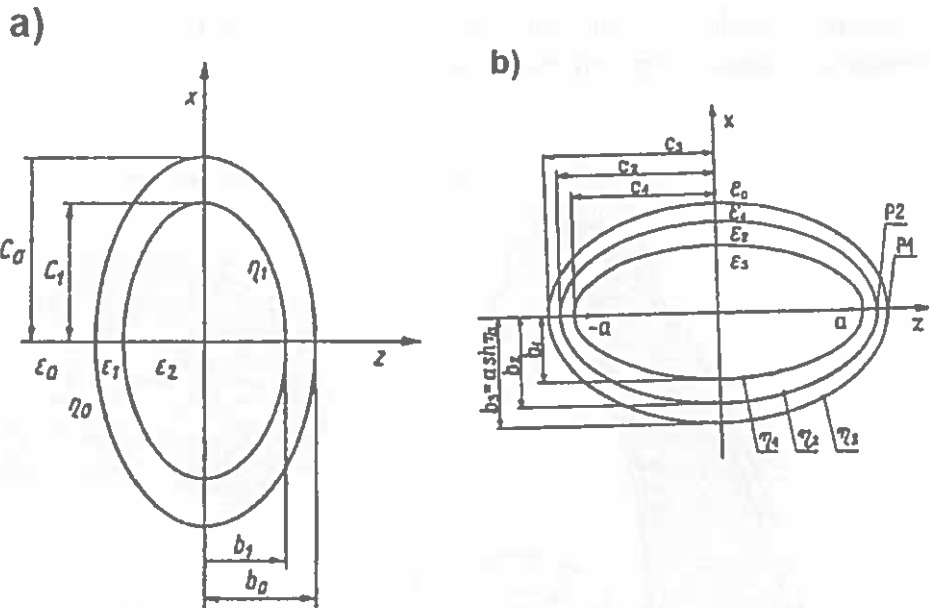
### 5.1. Budowa ziarniaka [118]

Ziarniak składa się: z zarodka, materiałów odżywczych (zapasowych), które zawarte są w tkance zwanej bielmem oraz zewnętrznej łupiny nasiennej (Rys. 3).



Rys. 3. Ważniejsze elementy budowy morfologicznej i anatomicznej ziarniaka pszenicy [118].  
 Fig. 3. Important elements in morphologic and anatomical structure of wheat grain [118].

Ze względu na kształt, jako model ziarniaka przyjmuje się sferoidę wydłużoną (Rys. 4a, b).



Rys. 4. Modele ziarniaka w postaci dielektrycznej sferoidy wydłużonej [8,9,22,83,97].  
Fig. 4. Grain models in the form of dielectric elongated spheroid [8,9,22,83, 97].

Substancje nagromadzone w nasionach i owocach różnią się pod względem chemicznym. Przeważają wśród nich węglowodany, tłuszcze i białka. Udział innych składników, takich jak witaminy, enzymy, regulatory wzrostu i in. jest niewielki. Stosunek ilościowy wymienionych trzech podstawowych składników jest zróżnicowany. Największy odsetek substancji zapasowych przypada na węglowodany i tłuszcze (Tabela 1) [14], co uważane jest za podstawę stosowanego niekiedy podziału nasion i owoców na mączyste i oleiste.

Grupa roślin zbożowych, do której zaliczamy: żyto, pszenicę, jęczmień, owies, wyróżnia się nasionami mączystymi. W nasionach tych zawartość węglowodanów dochodzi do 70÷80 %, natomiast udział tłuszczów i białek jest znacznie mniejszy.

Węglowodany występują w nasionach głównie w postaci skrobi, celulozy i hemicelulozy. Najwięcej jest tych składników w bielmie i obielmie, mogą jednak pojawiać się również w zarodku, a nawet w łupinie nasiennej. Na przykład, główną część masy nasienia pszenicy stanowi bielmo (70÷80 % masy owocu). Ponieważ

**T a b e l a 1.** Skład chemiczny niektórych nasion lub owoców (%) [14,24]  
**T a b l e 1.** Chemical composition of some seed and fruit (%) [14,24]

Gatunek	Sucha masa	Białko	Cukrowce bez błonnika	Błonnik	Tłuszcze	Sole mineralne
Pszenica:						
ozima	85.0	10.0	70.0	1.6	1.7	1.7
jara	85.0	13.2	66.1	1.8	2.0	1.9
Żyto ozime	85.0	7.2	73.2	1.6	1.5	1.5
Kukurydza	85.0	9.7	67.8	2.2	4.9	1.3
Groch	86.2	23.5	52.6	5.6	1.9	2.7

poszczególne warstwy ziarniaka zbudowane są z odmiennych materiałów, istnieją w jego obrębie różnice ciężaru właściwego poszczególnych jego części.

Różny jest też udział powietrza w objętości ziarniaka. Przykładowo, powietrze zajmuje 0÷13 % objętości w nasionach pszenicy jarej miękkiej, 8÷9 % objętości pszenicy jarej twardej.

Nasiona zawierają średnio do 15 % wody.

Ściany komórek łupiny nasiennej są przesycone zwykle ligniną lub suberyną i pokryte z zewnątrz kutykulą, co nadaje jej pewien stopień twardości.

Różnice gęstości poszczególnych gatunków nasion są m.in. przyczyną różnic przenikalności elektrycznej odmiennych gatunków. Na różnice przenikalności elektrycznej ma wpływ zróżnicowany skład chemiczny poszczególnych warstw.

Nasiona o wysokim stopniu twardości łupiny nasiennej zwane są nasionami twardymi. Są to nasiona o okrywach nieprzepuszczalnych dla wody, przez co nie pęcznią i nie kielkują w normalnie przyjętym terminie. Stosuje się sztuczne uszkodzenie okryw nasiennych bezpośrednio przed siewem, korzystając z metod mechanicznych, termicznych bądź chemicznych. W związku z istnieniem hipotezy o powstawaniu mikropęknięć w ziarniakach pod wpływem pola elektrostatycznego można przypuszczać, że w celu uszkodzenia okryw nasiennych można zastosować pole elektrostatyczne [14,60].

## 5.2. Właściwości elektryczne ziarniaków

Ziarniaki zbóż należą do grupy dielektryków o budowie niejednorodnej o słabej polaryzowalności [9]. Do najważniejszych parametrów elektrycznych ziarniaków należą:

- rezystywność,

- przenikalność elektryczna,
- tangens kąta stratności.

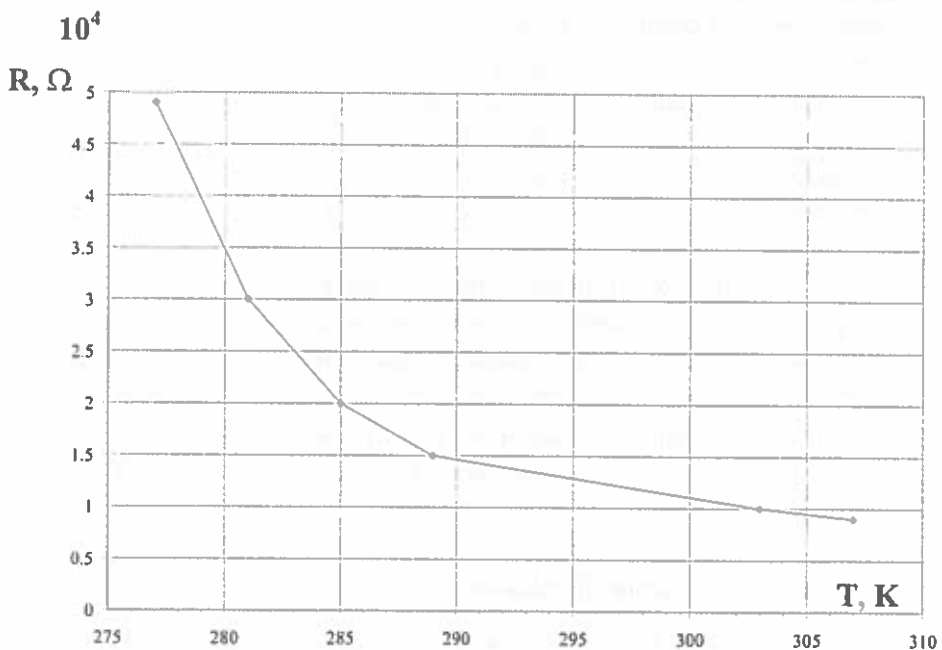
Parametry te zależą od wielu czynników takich jak: rodzaj ziarna i związana z tym budowa wewnętrzna, wilgotność, temperatura, częstotliwość pola elektrycznego.

### 5.2.1. Rezystancja ziarniaków

Rezystancja ziarniaków zbóż zależy od wielu czynników, m.in.:

- temperatury,
- wilgotności,
- natężenia pola elektrycznego,
- częstotliwości pola elektrycznego.

Zarówno rezystancja jak i rezystywność ziarniaków maleją przy wzroście temperatury, podobnie jak w ciałach będących na pograniczu dielektryków i półprzewodników (Rys. 5).



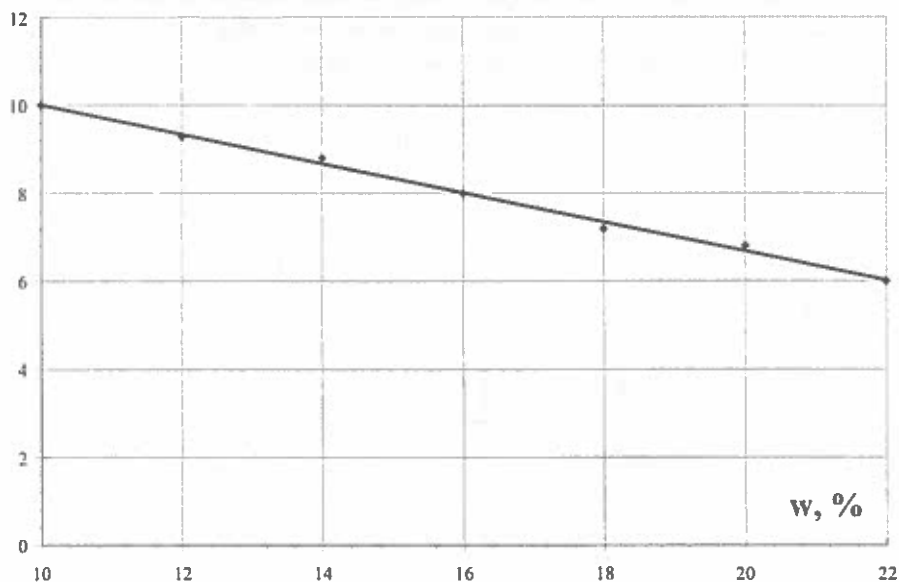
Rys. 5. Rezystancja ziarniaków pszenicy w funkcji temperatury  $R = f(T)$  [10,22].

Fig. 5. Wheat grain resistance vs. temperature  $R = f(T)$  [10,22].

Rezystancja ziarniaków zbóż zależy silnie od wilgotności. Wraz ze wzrostem wilgotności rezystancja maleje (Rys. 6).

Rezystancja ziarniaków maleje wraz ze wzrostem natężenia pola elektrycznego [1]. Szczególnie efekt ten jest widoczny przy wyższych wilgotnościach, w których ziarniaki nabierają właściwości półprzewodników. Można to wytłumaczyć pojawieniem się w ziarnie, w miarę wzrostu natężenia pola, prądu elektrycznego. Efekt ten został zaobserwowany szczególnie przy wyższych wilgotnościach ( $w \geq 15\%$ ). Przy większych wilgotnościach ( $w \geq 20\%$ ) ziarniaki nabierają właściwości ciał będących na pograniczu dielektryków i półprzewodników. Podobnie jak, w ciałach będących na pograniczu dielektryków i półprzewodników rezystancja ich maleje ze wzrostem temperatury. To zjawisko tłumaczy się wzrostem ruchliwości jonów tworzących siatkę krystaliczną.

$\log R, \Omega$



Rys. 6. Rezystancja ziarniaków pszenicy w funkcji wilgotności  $R = f(w)$  [10,22].

Fig. 6. Wheat grain resistance vs. moisture content  $R = f(w)$  [10,22].

### 5.2.2. Przenikalność elektryczna ziarniaków

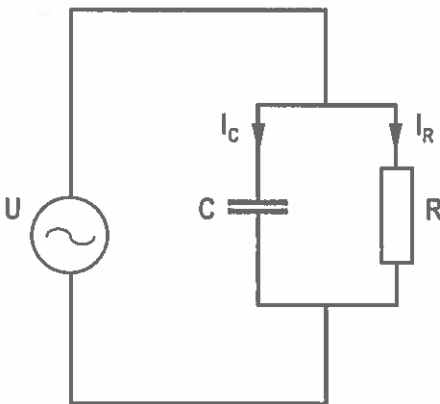
Przenikalność elektryczna nasion jest wielkością zespoloną [75]:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (6)$$

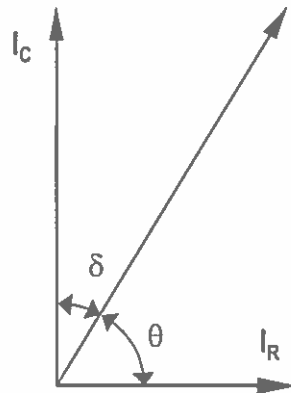
Dla określonej częstotliwości dielektryk może być przedstawiony w obwodzie elektrycznym w postaci idealnej pojemności i rezystancji (Rys. 7). Wykres wektorowy (wskazowy) napięcia i prądów dla zastępczego równoległego obwodu RC zasilanego napięciem przemiennym jest przedstawiony na Rys. 8 [64].

Część rzeczywista zespolonej względnej stałej dielektrycznej -  $\varepsilon'$ , 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.

Składowe  $\varepsilon$  zależą silnie od wilgotności i częstotliwości pola. Składowa rzeczywista i urojona wzrastają przy wzroście wilgotności, co jest związane z dużą przenikalnością elektryczną wody. Natomiast w funkcji częstości pola maleje składowa rzeczywista  $\varepsilon'$ , co wiąże się z zanikiem niektórych mechanizmów polaryzacji. Zależność ta jest przedziałami liniowa. Składowa urojona  $\varepsilon''$  jest natomiast nieregularną funkcją częstotliwości.

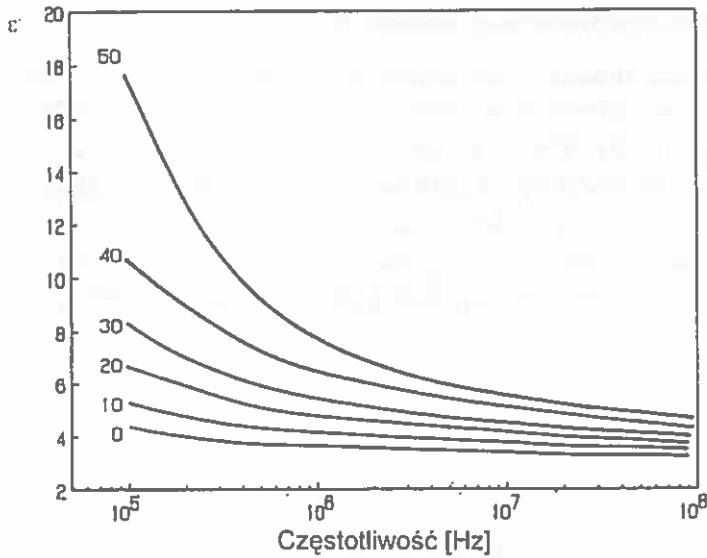


Rys. 7. Zastępczy - obwód równoległy RC [64].  
Fig. 7. Equivalent - parallel RC circuit [64].



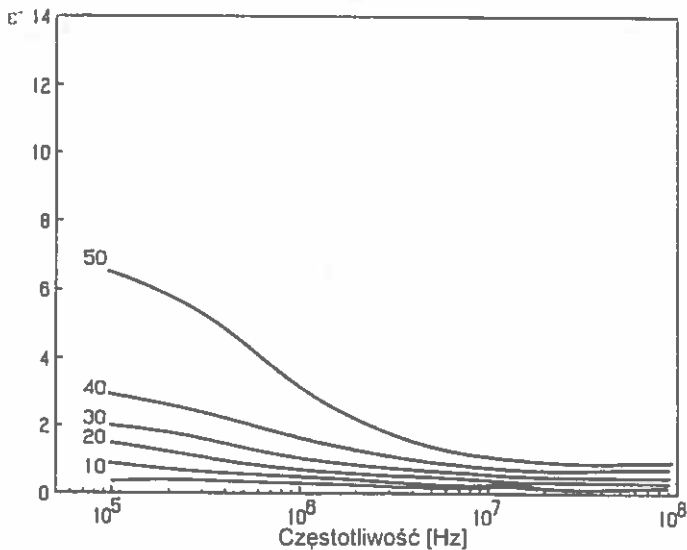
Rys. 8. Wykres wskazowy zastępczego obwodu równoległego [64].

Fig. 8. Vector graph of an equivalent parallel circuit [64].



Rys. 9. Zależność składowej rzeczywistej zespolonej przenikalności elektrycznej ziarna pszenicy ozimej od częstotliwości  $f$ , przy  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] = const.,  $w_{z\%} = 17\%$  [58].

Fig. 9. The dependence of a complex real component of grain electric permittivity of winter wheat of frequency  $f$ , at  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] = const.,  $w_{z\%} = 17\%$  [58].

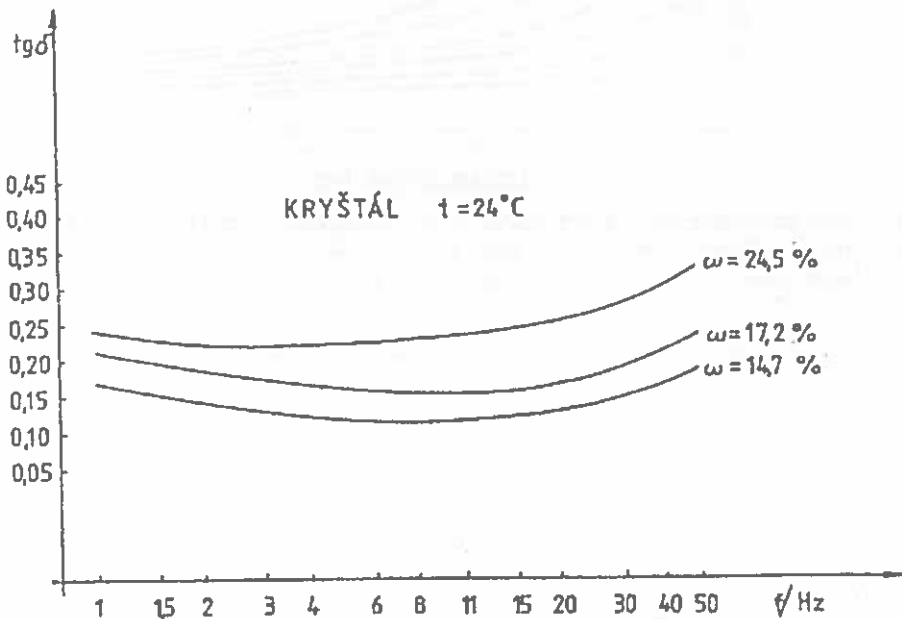


Rys. 10. Zależność składowej urojonej zespolonej przenikalności elektrycznej ziarna pszenicy ozimej od częstotliwości  $f$  przy  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] = const.,  $w_{z\%} = 17\%$  [58].

Fig. 10. The dependence of a complex imaginary component of grain electric permittivity of winter wheat of frequency  $f$ , at  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] = const.,  $w_{z\%} = 17\%$  [58].

### 5.2.3. Tangens kąta stratności ziarniaków

Tangens kąta stratności jest parametrem, którego znajomość jest istotna przy projektowaniu urządzeń suszarniczych wykorzystujących efekty oddziaływania pola elektrycznego na dielektryki. Tangens kąta stratności zależy od częstotliwości, wilgotności i temperatury. Przeprowadzone dotychczas badania stwierdzają niewielką zmianę  $\text{tg } \delta$  w funkcji częstotliwości. Większe zmiany tego parametru zaobserwowano pod wpływem wilgotności i temperatury. Tangens kąta stratności rośnie zarówno ze wzrostem wilgotności jak i temperatury ziarniaków.



Rys. 11. Zależność  $\text{tg } \delta$  jęczmienia Kryształ od częstotliwości  $f$  i wilgotności [25].

Fig. 11. The dependence of Kryształ barley on frequency  $f$  and moisture content [25].



## 6. BADANIA LABORATORYJNE

Dla określenia zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków zbóż od naprężeń mechanicznych oraz natężenia pola elektrostatycznego, przystosowano odpowiednią aparaturę i urządzenia pomiarowe. Z uwagi na bardzo mały obiekt badań jakim jest ziarniak oraz na charakter prowadzonych pomiarów zastosowano metody oparte na uśrednionej masie nasion.

Pomiary przeprowadzono na wyselekcjonowanej próbce ziarniaków. Ziarniaki przed pomiarem zostały wysezonowane w komorze klimatyzacyjnej. Przenikalność elektryczną ziarniaków zmierzono pośrednio, poprzez pomiar pojemności kondensatora nimi wypełnionego.

Z uwagi na oryginalność prowadzonych badań opracowano również własne metodyki badań oraz rozwiązania urządzeń pomiarowych. Całość pracy podzielono pod względem metodycznym na trzy główne części. Pierwsza obejmuje badanie wpływu zewnętrznych naprężeń mechanicznych na przenikalność elektryczną oraz rezystancję ziarniaków, druga zaś badanie zmian przenikalności elektrycznej i rezystancji ziarniaków w funkcji natężenia pola elektrostatycznego, trzecia zaś określenie korelacji między zmianami przenikalności elektrycznej wywołanymi zewnętrznymi naprężeniami mechanicznymi i zmianami wywołanymi pod wpływem pola elektrostatycznego.

### 6.1. Opis techniczny stosowanej aparatury

Do badań wykorzystano komorę klimatyzacyjną, miernik wilgotności, wagę laboratoryjną, mostek RLC i miernik izolacji (źródło wysokiego napięcia WN).

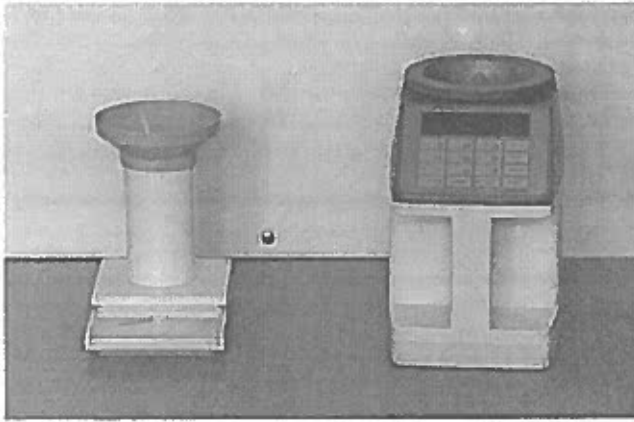
#### *Dane techniczne komory klimatyzacyjnej*

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

W komorze zapewniona jest automatyczna stabilizacja nastawionych wartości wilgotności i temperatury w granicach tolerancji dla wilgotności  $\pm 1,5$  %, dla temperatury  $\pm 0,5$  K.

#### *Dane techniczne miernika wilgotności*

Typ - Grainer II PM-300, zakres pomiarowy: 1,0÷40,0 %, dokładność pomiaru 0,2÷0,5 %, powtarzalność pomiarów z dokładnością 0,05÷0,2 %, masa próbki 20÷180 g, producent KETT Electric Laboratory, Tokyo, Japonia.

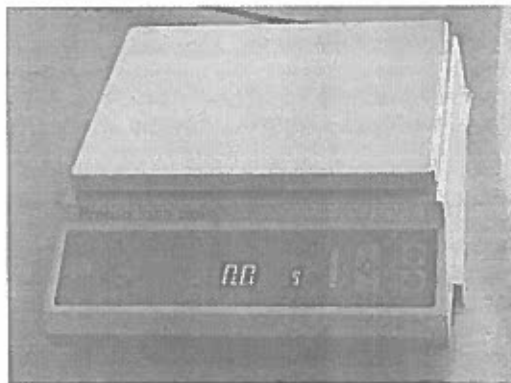


Rys. 12. Miernik do pomiaru wilgotności ziarna oraz waga do ważenia próbek pomiarowych.  
 Fig. 12. Grain moisture content meter and a weight for samples.

Określenie wilgotności odbywa się w sposób pośredni, poprzez pomiar przenikalności elektrycznej materiału badanego przy częstotliwości 50 MHz. Kompensacja temperatury odbywa się automatycznie z wykorzystaniem termistora wbudowanego w układ pomiarowy. Miernik przeznaczony jest do pomiaru wilgotności materiałów roślinnych. Umożliwia on pomiar wilgotności względnej 30-tu produktów roślinnych.

*Dane techniczne wagi laboratoryjnej*

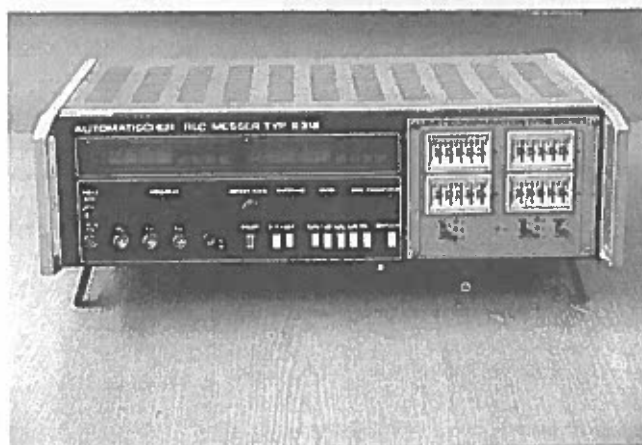
Typ - 5000D-12000G Precisa, zakres pomiarowy  $0 \div 5050/0 \div 12400$  g; odczyt 0,1/1 g; powtarzalność 0,1/0,5; producent PAG Oerlikon AG, Zürich - Szwajcaria.



Rys. 13. Waga laboratoryjna.  
 Fig. 13. Laboratory electronic weight.

### *Dane techniczne mostka RLC*

Typ - E318, zakres pomiarowy  $0,05 \text{ pF} \div 200 \text{ } \mu\text{F}$ ; dokładność pomiaru pojemności  $0,1 \div 0,3 \%$ ; producent - P.A. i A.P. MERATRONIK, Szczecin.

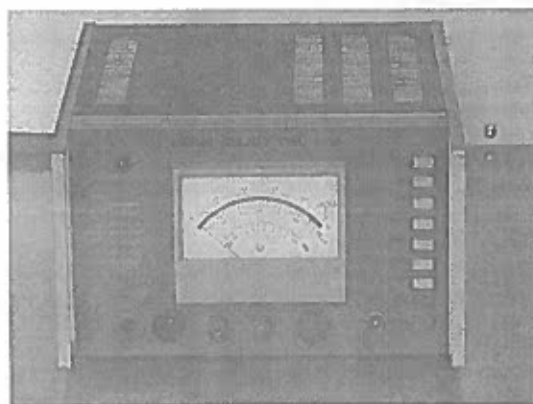


Rys. 14. Mostek RLC.

Fig. 14. RLC bridge.

### *Dane techniczne miernika izolacji (źródło wysokiego napięcia WN)*

Typ - P435, zakres regulacji napięcia probierczego -  $20 \text{ V} \div 10 \text{ kV}$ , zakres pomiaru prądu  $0,01 \div 300 \text{ } \mu\text{A}$ ; producent - P.A. i A.P. MERATRONIK, Szczecin.



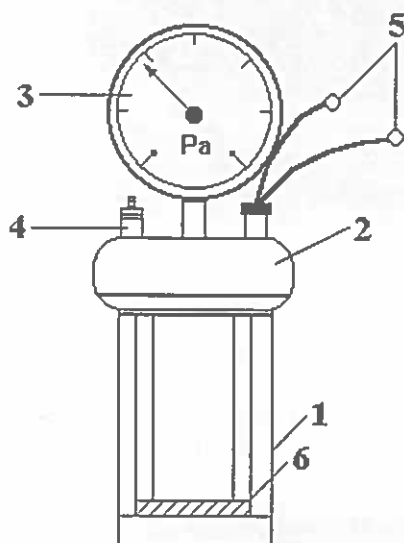
Rys. 15. Miernik izolacji (źródło wysokiego napięcia WN).

Fig. 15. Insulation meter ( high voltage source WN).

## 6.2. Pomiar przenikalności elektrycznej nasion zbóż w funkcji naprężeń mechanicznych

### 6.2.1. Opis stanowiska do pomiaru przenikalności elektrycznej nasion zbóż w funkcji naprężeń mechanicznych

Do wytwarzania określonych naprężeń mechanicznych wykonano zbiornik ciśnieniowy, wewnątrz którego umieszczano kondensator cylindryczny. W kondensatorze umieszczono badane ziarno. Widok zbiornika ciśnieniowego i sposób umieszczenia w nim kondensatora pomiarowego przedstawiono na Rys. 16.



Rys. 16. Widok zbiornika ciśnieniowego z kondensatorem pomiarowym: 1 - stalowy cylinder, 2 - pokrywa, 3 - manometr, 4 - zawór, 5 - przewody kondensatora pomiarowego, 6 - kondensator pomiarowy.

Fig. 16. Pressure vessel and a measuring capacitor: 1 - steel cylinder, 2 - cover, 3 - manometer, 4 - valve, 5 - measuring capacitor leads, 6 - measuring capacitor.

Zbiornik ciśnieniowy zbudowany jest ze stalowego cylindra (1). Zbiornik ten jest zamykany dokręcaną od góry stalową pokrywą (2). W pokrywie umieszczony jest manometr (3) oraz zawór (4) umożliwiający doprowadzenie sprężonego powietrza. Jako źródło sprężonego powietrza zastosowano kompresor DONAU RS/7, który umożliwia osiągnięcie ciśnienia w zbiorniku ciśnieniowym 784560 Pa. Kompresor jest wyposażony w osuszacz i reduktor, który zapewnia precyzyjne ustawianieżądanego ciśnienia w cylindrze. W celu dokładniejszego osuszenia powietrza, włączanego do cylindra, skonstruowano dodatkowy filtr, który spełniał dwie funkcje - zatrzymywał wnikające do cylindra skropliny, oraz osuszał powietrze z pary wodnej.

W środku stalowego cylindra umieszczano cylindryczny kondensator pomiarowy z badanym dielektrykiem (Rys. 16).

Do pomiaru przenikalności elektrycznej wykorzystywano automatyczny mostek RLC typ E 318. Przy pomiarze przenikalności elektrycznej ziarniaki umieszczano w kondensatorze cylindrycznym. Naprężenia mechaniczne działające na ziarniaki wywoływano sprężonym powietrzem. Wartość zewnętrznej siły mechanicznej regulowano reduktorem ciśnienia powietrza podawanego ze sprężarki.

## 6.2.2. Metodyka pomiaru przenikalności elektrycznej nasion zbóż w funkcji naprężeń mechanicznych

### I. Przygotowanie komory klimatyzacyjnej

- Wyregulowano w komorze zadaną wartość temperatury i wilgotności. Zależność wilgotności ziarniaka ( $w_{\%z}$ ) od wilgotności powietrza ( $w_{\%}$ ) przedstawiono w Tabeli 2 [81].

T a b e l a 2. Zależność wilgotności ziarniaka ( $w_{\%z}$ ) od wilgotności powietrza ( $w_{\%}$ )  
T a b l e 2. The dependence of grain moisture content ( $w_{\%z}$ ) on air humidity ( $w_{\%}$ )

Materiał	Temperatura (°C)	Wilgotność powietrza (%)							
		20	30	40	50	60	70	80	90
Pszenica	20	7.80	9.24	10.68	11.84	13.10	14.30	16.02	19.95
Żyto		8.26	9.47	10.88	12.20	13.46	15.18	17.43	20.80
Jęczmień		8.25	9.50	10.90	12.00	13.40	15.20	17.49	20.50
Owies		6.74	8.25	9.41	10.75	12.02	14.39	16.82	19.94

### II. Przygotowanie materiału badanego

- Przeprowadzono selekcję ziaren zbóż na sitach selekcyjnych.
- Umieszczono ziarna w komorze klimatyzacyjnej na określony czas ( $\tau \approx 72h$ ).
- Określono wilgotność ziarna po pobycie w komorze klimatyzacyjnej przy wykorzystaniu miernika wilgotności (wykorzystano miernik GRAINER II PM-300, KETT Grain Moisture Tester).

### III. Przygotowanie próbek

- Po wyjęciu materiału roślinnego z komory klimatyzacyjnej odważono próbkę materiału roślinnego.

### IV. Przeprowadzenie pomiarów

- Zmierzono pojemność  $C_0$  pustego kondensatora pomiarowego.
- Umieszczono kondensator pomiarowy z ziarniakami w cylindrze ciśnieniowym.
- Zamknięto szczelnie cylinder pomiarowy od góry stalową pokrywą.
- Ustawiono za pomocą reduktora określoną wartość ciśnienia w cylindrze.

- Przy zadanym ciśnieniu dokonano pomiaru pojemności kondensatora z badanymi ziarniakami zbóż.

- Pomiar wykonano 5-cio krotnie dla każdej z ustawionych wartości napięcia.

V. Obliczono wartość przenikalności elektrycznej mieszaniny badanego materiału roślinnego i powietrza korzystając z zależności:

$$\varepsilon_m = \frac{C_r}{C_0}, \quad (7)$$

gdzie:  $C_r$  - pojemność kondensatora wypełnionego materiałem roślinnym, pF,  $C_0$  - pojemność pustego kondensatora, pF.

VI. Wyniki pomiarów zestawiono w Tabeli 3, wzór której przedstawiono poniżej.

**Tabela 3.** Wzór tabeli wyników pomiaru przenikalności ziarniaków zbóż w funkcji ciśnienia  $w\% = \dots \%$ ,  $T = \dots K$

**Table 3.** Table pattern for test results of grain dielectric constant vs. pressure at  $w\% = \dots \%$ ,  $T = \dots K$

Seria	1	2	...	5
p (Pa)	$\varepsilon$	$\varepsilon$	...	$\varepsilon$
x 98070				
0			...	
1			...	
2			...	
...	...	...	...	...
8			...	

VII. Przenikalność elektryczną wyznaczoną w punktach 6.2.2., w celu uzyskania przenikalności nasion, przeliczono korzystając z zależności [102]:

$$\varepsilon = \frac{2\varepsilon_m^2 - \varepsilon_m(3x - 1)}{\varepsilon_m(2 - 3x) + 1}, \quad (8)$$

gdzie:  $x$  - współczynnik koncentracji powietrza (wyznaczony eksperymentalnie dla każdego gatunku nasion) [102].

W celu wyznaczenia współczynnika koncentracji z każdego gatunku nasion pobrano po trzy próbki o objętości  $100 \text{ cm}^3$ . Nasiona wsypano do menzurki, ze  $100 \text{ cm}^3$  wody. Przyrost objętości po wsypaniu nasion stanowi objętość nasion w  $100 \text{ cm}^3$  mieszaniny  $X_m$ . Współczynnik koncentracji, jako średnia z trzech powtórzeń wyznaczono z zależności [102]:

$$x = 1 - X_m \quad (9)$$

### 6.2.3. Wyniki pomiarów przenikalności elektrycznej nasion zbóż w funkcji naprężeń mechanicznych

Przedstawione wyniki pomiarów dotyczą mieszaniny: ziarniaki - powietrze.

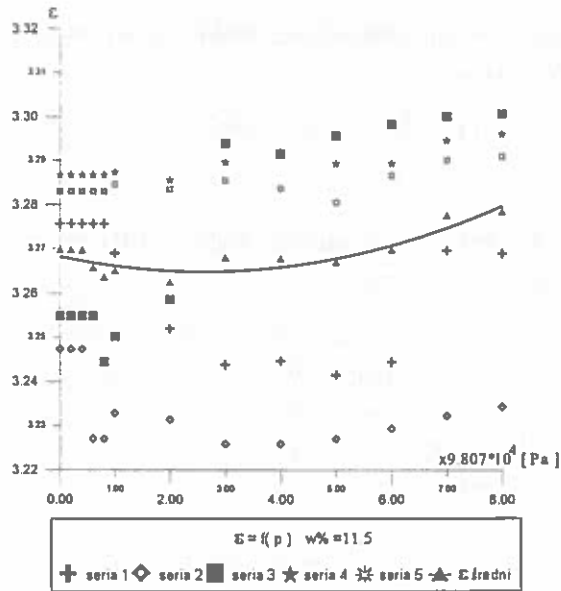
#### 6.2.3.1. Wyniki pomiarów przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia w funkcji naprężeń mechanicznych

Badanie przenikalności elektrycznej wykonano w 5-ciu seriach pomiarowych. Wartość ciśnienia w cylindrze pomiarowym zmieniano od 0 do 784560 Pa. W przedziale 0 ÷ 98070 Pa ciśnienie w cylindrze ciśnieniowym zmieniano co 19614 Pa, powyżej co 98070 Pa. Zakresy zmian ciśnienia zostały określone w wyniku wstępnych pomiarów badanej wielkości.

**Tabela 4.** Wyniki pomiaru przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia w funkcji ciśnienia:  $w_w = 11,5\%$ ,  $T = 293\text{ K}$

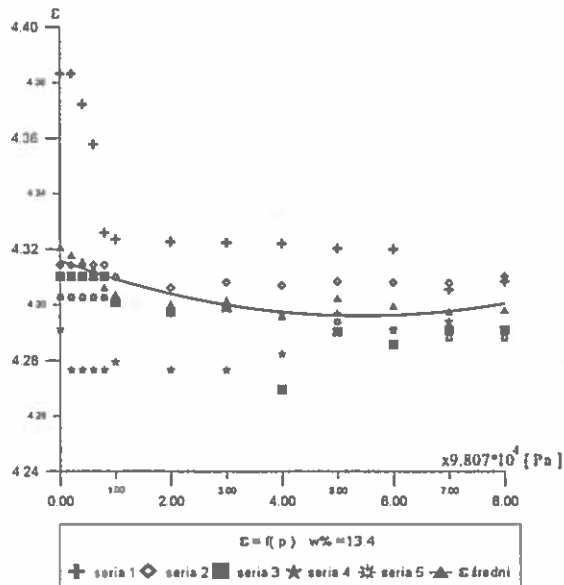
**Table 4.** Test results of grain dielectric constant vs. pressure at  $w_w = 11.5\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ , for barley

p (Pa) x 98070	Seria 1	Seria 2	Seria 3	Seria 4	Seria 5	$\epsilon_m$ średni
0	3,28	3,25	3,25	3,29	3,28	3,27
0,2	3,28	3,25	3,25	3,29	3,28	3,27
0,4	3,28	3,25	3,25	3,29	3,28	3,27
0,6	3,28	3,23	3,25	3,29	3,28	3,27
0,8	3,28	3,23	3,24	3,29	3,28	3,26
1	3,27	3,23	3,25	3,29	3,28	3,26
2	3,25	3,23	3,26	3,29	3,28	3,26
3	3,24	3,23	3,29	3,29	3,29	3,27
4	3,24	3,23	3,29	3,29	3,28	3,27
5	3,24	3,23	3,30	3,29	3,28	3,27
6	3,24	3,23	3,30	3,29	3,29	3,27
7	3,33	3,28	3,27	3,27	3,29	3,29
8	3,33	3,28	3,27	3,27	3,29	3,29



Rys. 17. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia w funkcji ciśnienia:  $w_{\%} = 11,5 \%$ ,  $T = 293 \text{ K}$ .

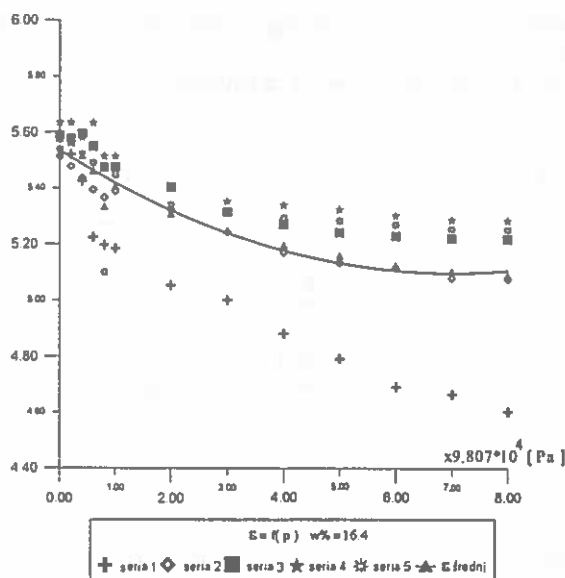
Fig. 17. The dependence of grain dielectric constant for barley vs. pressure:  $w_{\%} = 11.5 \%$ ,  $T = 293 \text{ K}$ .



Rys. 18. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia w funkcji ciśnienia:  $w_{\%} = 13,4 \%$ ,  $T = 293 \text{ K}$ .

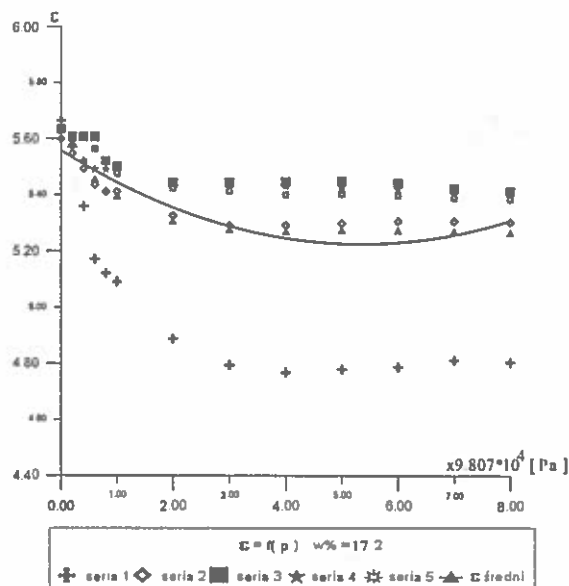
Fig. 18. The dependence of grain dielectric constant for barley vs. pressure:  $w_{\%} = 13.4 \%$ ,  $T = 293 \text{ K}$ .





Rys. 19. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia w funkcji ciśnienia:  $w\% = 16,4$  %,  $T = 293$  K.

Fig. 19. The dependence of grain dielectric constant for barley vs. pressure:  $w\% = 16.4$  %,  $T = 293$  K.



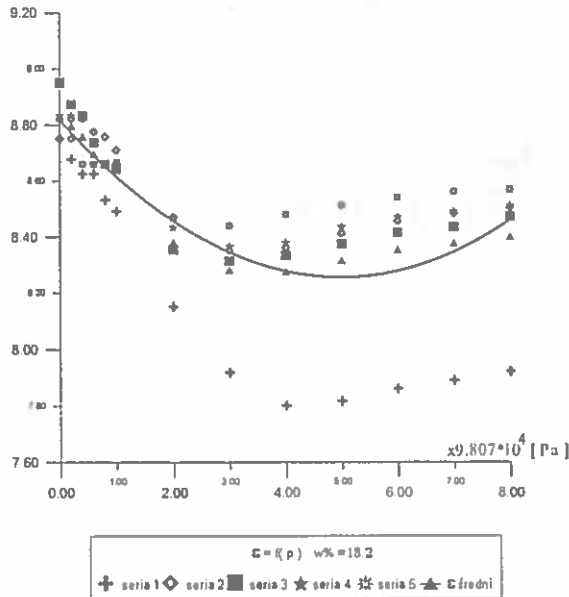
Rys. 20. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia w funkcji ciśnienia:  $w\% = 17,2$  %,  $T = 293$  K.

Fig. 20. The dependence of grain dielectric constant for barley vs. pressure:  $w\% = 17.2$  %,  $T = 293$  K.

Tabela 5. Wyniki pomiaru przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia w funkcji ciśnienia:  $w_{%} = 18,2\%$ ,  $T = 293\text{ K}$

Table 5. Test results of grain dielectric constant vs. pressure at:  $w_{%} = 18.2\%$ ,  $T = 293\text{ K}$  for barley

p (Pa) x 98070	Seria 1	Seria 2	Seria 3	Seria 4	Seria 5	$\epsilon_{m\text{ średni}}$
0	8,75	8,82	8,95	8,83	8,75	8,82
0,2	8,68	8,82	8,87	8,83	8,75	8,79
0,4	8,62	8,82	8,83	8,83	8,66	8,76
0,6	8,62	8,78	8,74	8,66	8,66	8,69
0,8	8,53	8,76	8,66	8,66	8,66	8,65
1	8,49	8,71	8,65	8,65	8,67	8,63
2	8,15	8,47	8,36	8,43	8,47	8,38
3	7,92	8,35	8,31	8,37	8,44	8,28
4	7,80	8,36	8,34	8,38	8,48	8,27
5	7,82	8,41	8,38	8,44	8,51	8,31
6	7,86	8,46	8,42	8,47	8,54	8,35
7	7,89	8,48	8,44	8,49	8,56	8,37
8	7,92	8,50	8,47	8,51	8,57	8,40



Rys. 21. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia w funkcji ciśnienia:  $w_{%} = 18,2\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .

Fig. 21. The dependence of grain dielectric constant for barley vs. pressure:  $w_{%} = 18.2\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .

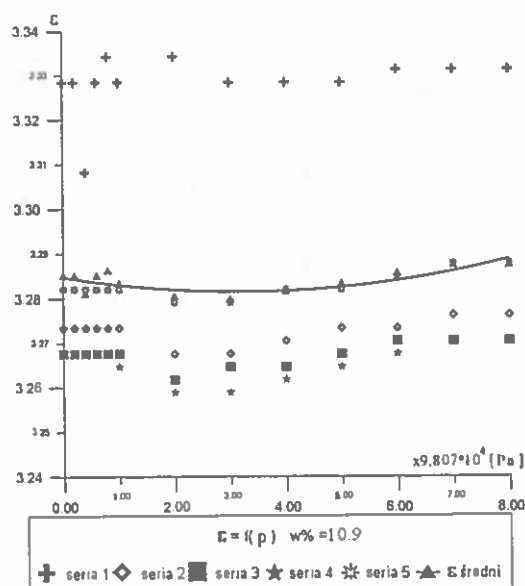
### 6.2.3.2. Wyniki pomiarów przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy w funkcji naprężeń mechanicznych

Badanie przenikalności elektrycznej wykonano w 5-ciu seriach pomiarowych analogicznie jak w p. 6.2.3.1.

T a b e l a 6. Wyniki pomiaru przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy w funkcji ciśnienia:  $w_{\%} = 10,9\%$ ,  $T = 293\text{ K}$

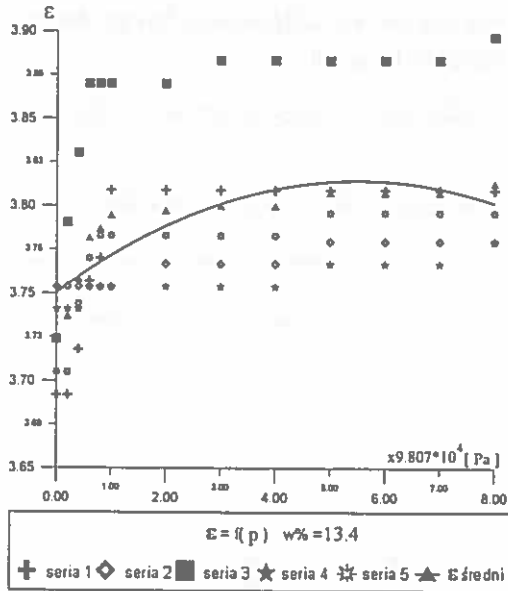
T a b l e 6. Test results of grain dielectric constant vs. pressure at  $w_{\%} = 10,9\%$ ,  $T = 293\text{ K}$  for wheat

p (Pa) x 98070	Seria 1	Seria 2	Seria 3	Seria 4	Seria 5	$\epsilon_m$ średni
0	3.33	3.33	3.27	3.27	3.28	3.29
0,2	3.33	3.33	3.27	3.27	3.28	3.29
0,4	3.31	3.31	3.27	3.27	3.28	3.28
0,6	3.33	3.33	3.27	3.27	3.28	3.29
0,8	3.33	3.33	3.27	3.27	3.28	3.29
1	3.33	3.33	3.27	3.26	3.28	3.28
2	3.33	3.33	3.26	3.26	3.28	3.28
3	3.33	3.33	3.26	3.26	3.28	3.28
4	3.33	3.33	3.26	3.26	3.28	3.28
5	3.33	3.33	3.27	3.26	3.28	3.28



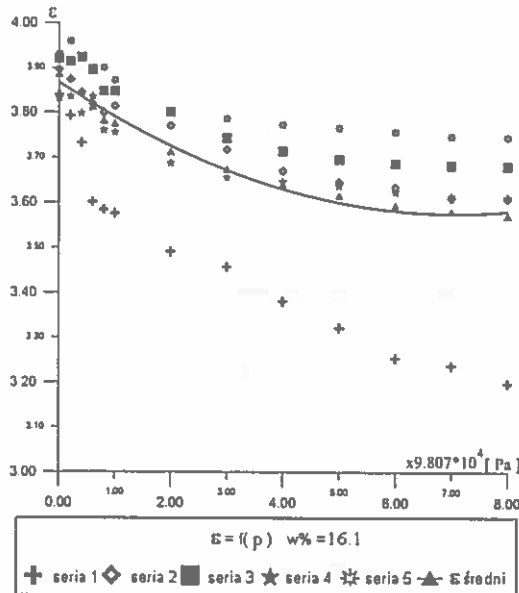
Rys. 22. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy w funkcji ciśnienia:  $w_{\%} = 10,9\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .

Fig. 22. The dependence of grain dielectric constant for wheat vs. pressure:  $w_{\%} = 10,9\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .



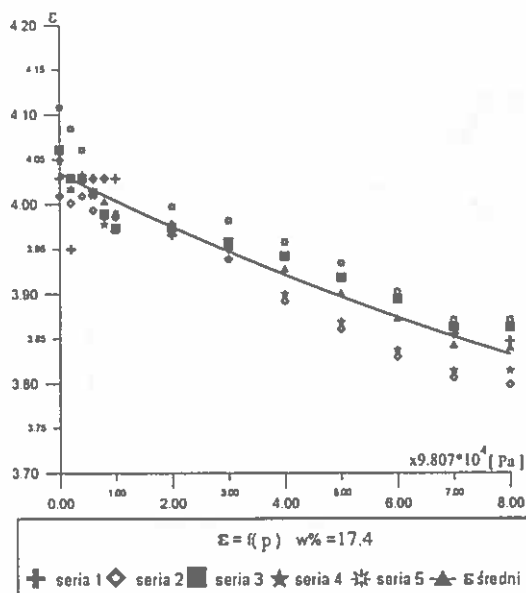
Rys. 23. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy w funkcji ciśnienia:  $w\% = 13,4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .

Fig. 23. The dependence of grain dielectric constant for wheat vs. pressure:  $w\% = 13,4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .



Rys. 24. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy w funkcji ciśnienia:  $w\% = 16,4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .

Fig. 24. The dependence of grain dielectric constant for wheat vs. pressure:  $w\% = 16,4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .



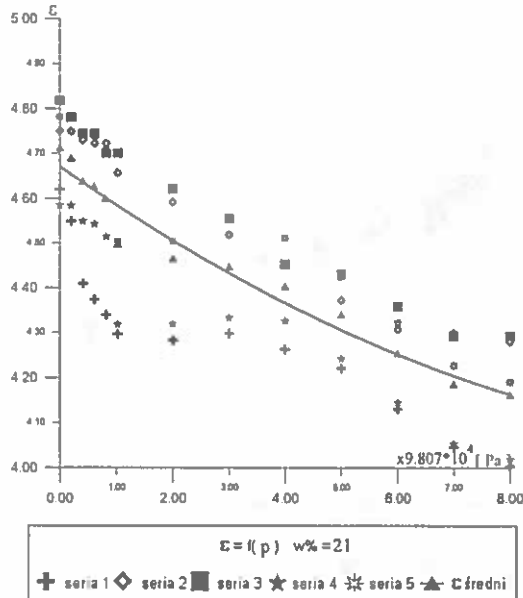
Rys. 25. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy w funkcji ciśnienia:  $w\% = 17.4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .

Fig. 25. The dependence of grain dielectric constant for wheat vs. pressure:  $w\% = 17.4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .

T a b e l a 7. Wyniki pomiaru przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy w funkcji ciśnienia:  $w\% = 21\%$ ,  $T = 293\text{ K}$

T a b l e 7. Test results of grain dielectric constant vs. pressure at  $w\% = 21\%$ ,  $T = 293\text{ K}$  for wheat

p (Pa) x 98070	Seria 1	Seria 2	Seria 3	Seria 4	Seria 5	$\epsilon_m$ średni
0	4.62	4.75	4.82	4.59	4.78	4.71
0,2	4.55	4.75	4.78	4.59	4.78	4.69
0,4	4.41	4.73	4.75	4.55	4.75	4.64
0,6	4.38	4.72	4.75	4.54	4.74	4.62
0,8	4.34	4.72	4.70	4.52	4.71	4.60
1	4.30	4.66	4.70	4.32	4.50	4.50
2	4.28	4.59	4.62	4.32	4.50	4.46
3	4.30	4.52	4.56	4.33	4.52	4.44
4	4.26	4.45	4.45	4.33	4.51	4.40
5	4.22	4.37	4.43	4.24	4.42	4.34
6	4.13	4.31	4.36	4.14	4.32	4.25
7	4.05	4.30	4.29	4.05	4.23	4.18
8	4.00	4.28	4.29	4.02	4.19	4.16



Rys. 26. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy w funkcji ciśnienia:  $w_{\%} = 21\%$ ,  $T = 293 \text{ K}$ .

Fig. 26. The dependence of grain dielectric constant for wheat vs. pressure:  $w_{\%} = 21\%$ ,  $T = 293 \text{ K}$ .

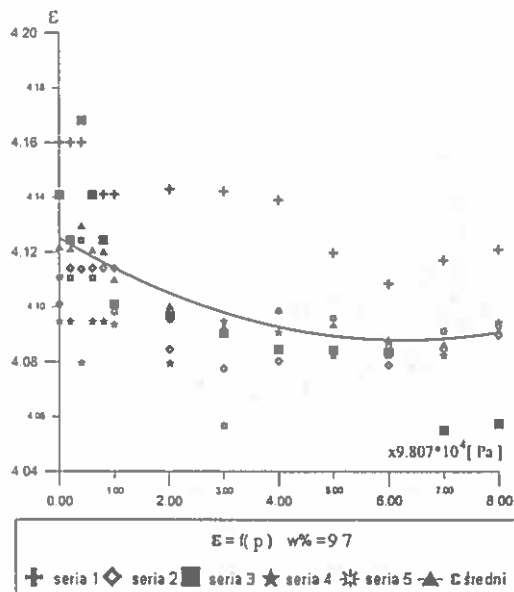
### 6.2.3.3. Wyniki pomiarów przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta w funkcji naprężeń mechanicznych

Badanie przenikalności elektrycznej wykonano w 5-ciu seriach pomiarowych analogicznie jak w p. 6.2.3.1.

Tabela 8. Wyniki pomiaru przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta w funkcji ciśnienia:  $w_{\%} = 9,7\%$ ,  $T = 293 \text{ K}$

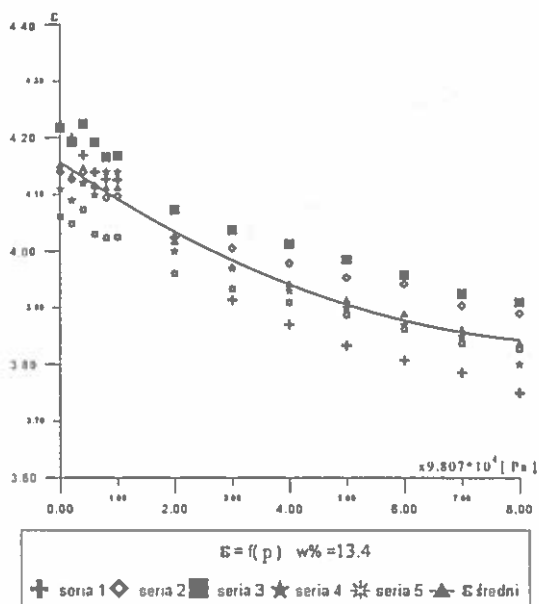
Table 8. Test results of grain dielectric constant vs. pressure at  $w_{\%} = 9.7\%$ ,  $T = 293 \text{ K}$  for rye

p (Pa) x 98070	Seria 1	Seria 2	Seria 3	Seria 4	Seria 5	$\epsilon_m$ średni
0	4,16	4,10	4,14	4,09	4,11	4,12
0,2	4,16	4,11	4,12	4,09	4,11	4,12
0,4	4,16	4,11	4,17	4,08	4,12	4,13
0,6	4,14	4,11	4,14	4,09	4,11	4,12
0,8	4,14	4,11	4,12	4,09	4,12	4,12
1	4,14	4,11	4,10	4,09	4,10	4,11
2	4,14	4,08	4,10	4,08	4,10	4,10
3	4,14	4,08	4,09	4,09	4,06	4,09
4	4,14	4,08	4,08	4,09	4,10	4,10
5	4,12	4,08	4,08	4,08	4,10	4,09
6	4,11	4,08	4,08	4,08	4,09	4,09
7	4,12	4,08	4,05	4,08	4,09	4,09
8	4,12	4,09	4,06	4,09	4,09	4,09



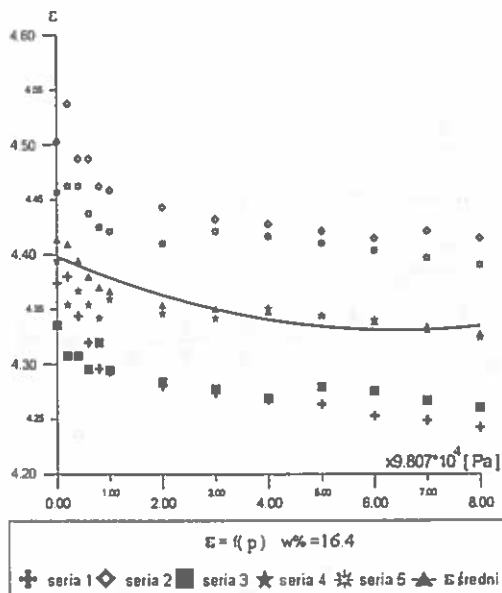
Rys. 27. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta w funkcji ciśnienia:  $w_{\%} = 9,7\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .

Fig. 27. The dependence of grain dielectric constant for rye vs. pressure:  $w_{\%} = 9.7\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .



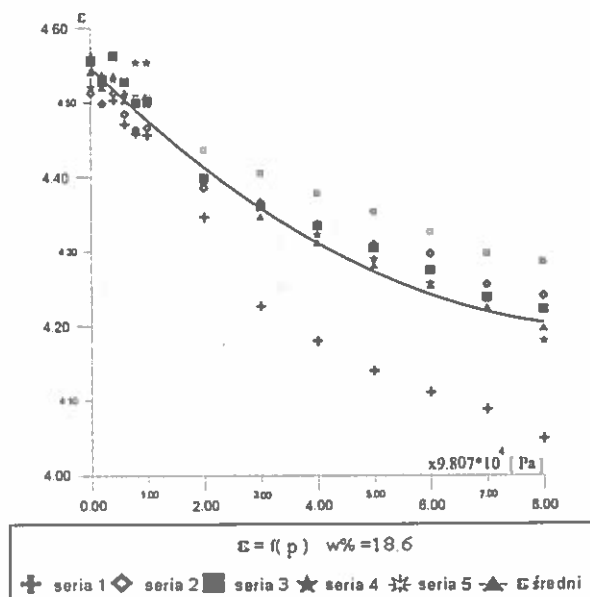
Rys. 28. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta w funkcji ciśnienia:  $w_{\%} = 13,4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .

Fig. 28. The dependence of grain dielectric constant for rye vs. pressure:  $w_{\%} = 13.4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .



Rys. 29. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta w funkcji ciśnienia;  $w_z = 16,4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .

Fig. 29. The dependence of grain dielectric constant for rye vs. pressure;  $w_z = 16.4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .



Rys. 30. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta w funkcji ciśnienia;  $w_z = 18,6\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .

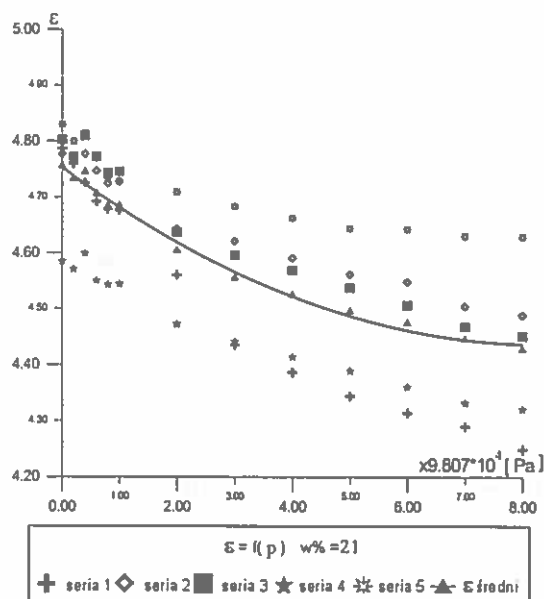
Fig. 30. The dependence of grain dielectric constant for rye vs. pressure;  $w_z = 18.6\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .



**Tabela 9.** Wyniki pomiaru przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta w funkcji ciśnienia:  $w_{s_0} = 21\%$ ,  $T = 293\text{ K}$

**T a b l e 9.** Test results of grain dielectric constant vs. pressure at  $w_{s_0} = 21\%$ ,  $T = 293\text{ K}$  for rye

p (Pa) x 98070	Seria 1	Seria 2	Seria 3	Seria 4	Seria 5	$\epsilon_m$ średni
0	4,79	4,78	4,80	4,59	4,83	4,76
0,2	4,76	4,76	4,77	4,57	4,80	4,73
0,4	4,73	4,78	4,81	4,60	4,82	4,75
0,6	4,69	4,75	4,77	4,55	4,77	4,71
0,8	4,68	4,73	4,74	4,54	4,73	4,68
1	4,68	4,73	4,75	4,54	4,73	4,68
2	4,56	4,64	4,64	4,47	4,71	4,60
3	4,44	4,62	4,60	4,44	4,68	4,56
4	4,39	4,59	4,57	4,41	4,66	4,52
5	4,34	4,56	4,54	4,39	4,64	4,50
6	4,31	4,55	4,51	4,36	4,64	4,47
7	4,29	4,50	4,47	4,33	4,63	4,45
8	4,25	4,49	4,45	4,32	4,63	4,43



**Rys. 31.** Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta w funkcji ciśnienia:  $w_{s_0} = 21\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .

**Fig. 31.** The dependence of grain dielectric constant for rye vs. pressure:  $w_{s_0} = 21\%$ ,  $T = 293\text{ K}$

#### 6.2.4. Analiza wyników badań przenikalności elektrycznej ziarniaków w funkcji naprężeń mechanicznych

Głównym celem prowadzonych pomiarów było zbadanie wpływu naprężeń mechanicznych na przenikalność elektryczną ziarniaków oraz określenie korelacji między wpływem tych naprężeń i naprężeń strykecyjnych na przenikalność.

Interesującym zagadnieniem wydaje się być również zbadanie ewentualnych związków między wpływem wyżej wymienionych wymuszeń na ziarniaki jakie mogą wystąpić między poszczególnymi gatunkami nasion (w tym przypadku: jęczmień, pszenica, żyto).

Funkcją statystyczną pokazującą w sposób przejrzysty związanice występujące między dwoma porównywanymi zbiorami danych jest współczynnik korelacji [110]. Równanie współczynnika i jego interpretacja zostały przedstawione w dalszej części pracy (rozdział 6.2.5, wzór 16).

W niniejszym rozdziale podane zostały również wartości odchyień standardowych  $\delta$  dla przeprowadzonych pomiarów. Odchylenie standardowe zostało obliczone na podstawie wzoru [110]:

$$\delta_n = \sqrt{\frac{\sum(\varepsilon_i - \varepsilon_{sr})^2}{N}}, \text{ przy } i = 1, \dots, n \quad (10)$$

gdzie:  $N$  - liczba powtórzeń pomiarów dla danej wartości ciśnienia.

Przy obliczaniu błędów przypadkowych dla wartości średnich korzystamy z rozkładu t-Studenta według następującej procedury:

Obliczamy liczbę stopni swobody  $n_f = N - 1$

Dla danego poziomu ufności i określonej wartości  $n_f$  odczytujemy z tablicy danych rozkładu t-Studenta wartość współczynnika  $t$

Obliczamy błąd przypadkowy dla wartości średniej z zależności  $\Delta\varepsilon_{m \text{ średni}}$ :

$$\Delta\varepsilon_{m \text{ średni}} = \pm \frac{t\delta}{\sqrt{N}} \quad (11)$$

Wynik pomiaru  $\varepsilon$  odnosi się do wartości średniej  $\Delta\varepsilon_{m \text{ średni}}$ , przyjmując wartości graniczne równie:

$$\varepsilon = \varepsilon_{m \text{ średni}} \pm t \frac{\delta}{\sqrt{N}}, \quad (12)$$

przy czym współczynnik  $a$  określa żądaną wartość prawdopodobieństwa.

Procentową zmianę przenikalności elektrycznej  $\Delta\varepsilon$  wyznaczono z zależności:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\varepsilon_k - \varepsilon_p}{\varepsilon_p} 100, \% \quad (13)$$

gdzie:  $\varepsilon_p$  - przenikalność elektryczna ziarniaków przed ściskaniem,  $\varepsilon_k$  - przenikalność elektryczna ziarniaków przy k-tej wartości ciśnienia.

W Tabelach 10-15, zostały podane zmiany przenikalności elektrycznej  $\Delta\varepsilon$  ziarniaków oraz odpowiadające im odchylenia standardowe  $\delta$  dla skrajnych wartości ich wilgotności.

**Tabela 10.** Zmiana przenikalności elektrycznej  $\Delta\varepsilon$  oraz odchylenie standardowe  $\delta$  w funkcji ciśnienia dla ziarniaków jęczmienia o wilgotności  $w_w = 11,5\%$

**Table 10.** Dielectric constant change  $\Delta\varepsilon$  and standard deviation  $\delta$  vs. pressure for barley at moisture content  $w_w = 11.5\%$

p (Pa) x 98070	$\varepsilon_m$ średni	$\delta$	$\Delta\varepsilon_m$ średni	$\Delta\varepsilon$ (%)
0	3,27	0,016	0,007	0,0
0,2	3,27	0,016	0,007	0,0
0,4	3,27	0,016	0,007	0,0
0,6	3,27	0,021	0,009	0,0
0,8	3,26	0,023	0,010	-0,3
1	3,26	0,019	0,009	-0,3
2	3,26	0,018	0,008	-0,3
3	3,27	0,026	0,012	0,0
4	3,27	0,025	0,011	0,0
5	3,27	0,026	0,012	0,0
6	3,27	0,028	0,013	0,0
7	3,28	0,021	0,009	0,3
8	3,28	0,022	0,010	0,3

**Tabela 11.** Zmiana przenikalności elektrycznej  $\Delta\epsilon$  oraz odchylenie standardowe  $\delta$  w funkcji ciśnienia dla ziarniaków jęczmienia o wilgotności  $w\% = 18,2\%$

**Table 11.** Dielectric constant change  $\Delta\epsilon$  and standard deviation  $\delta$  vs. pressure for barley at moisture content  $w\% = 18.2\%$

$p$ (Pa) x 98070	$\epsilon_m$ <i>średni</i>	$\delta$	$\Delta\epsilon_m$ <i>średni</i>	$\Delta\epsilon$ (%)
0	8,82	0,056	0,025	0,0
0,2	8,79	0,060	0,027	-0,3
0,4	8,76	0,090	0,040	-0,7
0,6	8,69	0,054	0,024	-1,5
0,8	8,65	0,050	0,022	-1,9
1	8,63	0,058	0,026	-2,2
2	8,38	0,097	0,043	-5,0
3	8,28	0,143	0,064	-6,1
4	8,27	0,189	0,084	-6,2
5	8,31	0,197	0,088	-5,8
6	8,35	0,196	0,088	-5,3
7	8,37	0,193	0,086	-5,1
8	8,40	0,190	0,085	-4,8

**Tabela 12.** Zmiana przenikalności elektrycznej  $\Delta\epsilon$  oraz odchylenie standardowe  $\delta$  w funkcji ciśnienia dla ziarniaków pszenicy o wilgotności  $w\% = 10,9\%$

**Table 12.** Dielectric constant change  $\Delta\epsilon$  and standard deviation  $\delta$  vs. pressure for wheat at moisture content  $w\% = 10.9\%$

$p$ (Pa) x 98070	$\epsilon_m$ <i>średni</i>	$\delta$	$\Delta\epsilon_m$ <i>średni</i>	$\Delta\epsilon$ (%)
0	3,29	0,018	0,008	0,0
0,2	3,29	0,018	0,008	0,0
0,4	3,28	0,012	0,005	-0,3
0,6	3,29	0,018	0,008	0,0
0,8	3,29	0,018	0,008	0,0
1	3,28	0,019	0,009	-0,3
2	3,28	0,020	0,009	-0,3
3	3,28	0,020	0,009	-0,3
4	3,28	0,020	0,009	-0,3
5	3,28	0,019	0,009	-0,3
6	3,29	0,019	0,009	0,0
7	3,29	0,018	0,008	0,0
8	3,29	0,018	0,008	0,0

**T a b e l a 13.** Zmiana przenikalności elektrycznej  $\Delta\epsilon$  oraz odchylenie standardowe  $\delta$  w funkcji ciśnienia dla ziemiaków pszenicy o wilgotności  $w_{\%} = 21\%$

**T a b l e 13.** Dielectric constant change  $\Delta\epsilon$  and standard deviation  $\delta$  vs. pressure for wheat at moisture content  $w_{\%} = 21\%$

p (Pa) x 98070	$\epsilon_m$ średni	$\delta$	$\Delta\epsilon_m$ średni	$\Delta\epsilon$ (%)
0	4,71	0,086	0,038	0,0
0,2	4,69	0,096	0,043	-0,4
0,4	4,64	0,126	0,057	-1,5
0,6	4,62	0,133	0,059	-1,9
0,8	4,60	0,134	0,060	-2,3
1	4,50	0,149	0,067	-4,5
2	4,46	0,130	0,058	-5,3
3	4,44	0,105	0,047	-5,7
4	4,40	0,084	0,038	-6,6
5	4,34	0,085	0,038	-7,9
6	4,25	0,094	0,042	-9,8
7	4,18	0,107	0,048	-11,3
8	4,16	0,117	0,052	-11,7

**T a b e l a 14.** Zmiana przenikalności elektrycznej  $\Delta\epsilon$  oraz odchylenie standardowe  $\delta$  w funkcji ciśnienia dla ziemiaków żyta o wilgotności  $w_{\%} = 9,7\%$

**T a b l e 14.** Dielectric constant change  $\Delta\epsilon$  and standard deviation  $\delta$  vs. pressure for rye at moisture content  $w_{\%} = 9.7\%$

p (Pa) x 98070	$\epsilon_m$ średni	$\delta$	$\Delta\epsilon_m$ średni	$\Delta\epsilon$ (%)
0	4,12	0,024	0,011	0,0
0,2	4,12	0,018	0,008	0,0
0,4	4,13	0,030	0,013	0,2
0,6	4,12	0,018	0,008	0,0
0,8	4,12	0,013	0,006	0,0
1	4,11	0,014	0,006	-0,2
2	4,10	0,016	0,007	-0,5
3	4,09	0,019	0,009	-0,7
4	4,10	0,018	0,008	-0,5
5	4,09	0,014	0,006	-0,7
6	4,09	0,010	0,004	-0,7
7	4,09	0,017	0,008	-0,7
8	4,09	0,012	0,005	-0,7

**Tabela 15.** Zmiana przenikalności elektrycznej  $\Delta\varepsilon$  oraz odchylenie standardowe  $\delta$  w funkcji ciśnienia dla ziemiaków żyta o wilgotności  $w_{\%} = 21\%$

**Table 15.** Dielectric constant change  $\Delta\varepsilon$  and standard deviation  $\delta$  vs. pressure for rye at moisture content  $w_{\%} = 21\%$

p (Pa) x 98070	$\varepsilon_{m\ \acute{s}redni}$	$\delta$	$\Delta\varepsilon_{m\ \acute{s}redni}$	$\Delta\varepsilon$ (%)
0	4,76	0,067	0,030	0,0
0,2	4,73	0,065	0,029	-0,6
0,4	4,75	0,066	0,030	-0,2
0,6	4,71	0,069	0,031	-1,1
0,8	4,68	0,059	0,026	-1,7
1	4,68	0,061	0,027	-1,7
2	4,60	0,071	0,032	-3,4
3	4,56	0,093	0,042	-4,2
4	4,52	0,099	0,044	-5,0
5	4,50	0,103	0,046	-5,5
6	4,47	0,111	0,050	-6,1
7	4,45	0,107	0,048	-6,5
8	4,43	0,114	0,051	-6,9

Na przykładzie jęczmienia o wilgotności  $w_{\%} = 11,5\%$  (Tabela 4), dla ciśnienia  $P = 784560$  Pa, i poziomu ufności 80 % można podać, że wartość zmierzona jest równa:

$$\varepsilon = \varepsilon_{m\ \acute{s}redni} \pm t \frac{\delta}{\sqrt{N}} = 3,28 \pm 0,016, \quad (14)$$

Jeżeli zwiększymy poziom ufności, np. do 95 %, to wynik pomiaru będzie:

$$\varepsilon = \varepsilon_{m\ \acute{s}redni} \pm t \frac{\delta}{\sqrt{N}} = 3,28 \pm 0,027. \quad (15)$$

### 6.2.5. Określanie korelacji pomiędzy gatunkami nasion i wpływem ciśnienia na ich przenikalność elektryczną

W celu określenia zależności pomiędzy wpływem naprężeń mechanicznych, a przenikalnością elektryczną na poszczególne gatunki zbóż zastosowano funkcję korelacja [110]. Umożliwia ona stwierdzenie, czy istnieje zależność między zmianami przenikalności elektrycznej wywołanymi naprężeniami mechanicznymi pomiędzy gatunkami nasion o tej samej lub zbliżonej wilgotności. Badanie tej funkcji przeprowadzono przedziałami w celu wyznaczenia przedziałów, dla których zbiczność ta jest najsilniejsza.

Korelacja mierzy zależność pomiędzy dwoma zbiorami danych przeskalowanymi tak, by były niezależne od jednostek miar. Obliczenie korelacji populacji podaje kowariancję dwóch zbiorów danych, podzieloną przez iloczyn ich odchyłek standardowych. Narzędzie korelacja można wykorzystać do określenia, czy dwa zbiory danych przesuwają się razem; to znaczy, czy duże wartości jednego zbioru są związane z dużymi wartościami drugiego (korelacja dodatnia), czy małe wartości jednego zbioru są związane z dużymi wartościami drugiego (korelacja ujemna), czy też wartości w obydwu zbiorach są nie związane (korelacja bliska zeru).

Równanie współczynnika korelacji  $\rho_{x,y}$  jest następujące [110]:

$$\rho_{x,y} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (16)$$

gdzie:

$$-1 \leq \rho_{x,y} \leq 1 \quad (17)$$

i:

$$Cov(X,Y) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \mu_x)(y_j - \mu_y) \quad (18)$$

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  $Y$ ,  $\mu_x, \mu_y$  - odpowiednio średnie danych zbioru  $X$  i  $Y$ .

Dodatnie wartości współczynnika korelacji wskazują, że wzrostowi (spadkowi) pod wpływem ciśnienia dla jednego gatunku nasion towarzyszy wzrost (spadek) pod wpływem tego samego rodzaju wymuszenia dla drugiego gatunku. Dowodzi to o silnym związaniu 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 niezwiązane.

**Tabela 16.** Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziarniaków jęczmienia i pszenicy o wilgotności  $w_{\%} = \text{const.}$ , w funkcji ciśnienia

**Table 16.** Correlation coefficients  $\rho$  vs. pressure for barley and wheat of moisture content  $w_{\%} = \text{const.}$

Lp.	p (Pa) x 98070	$\rho$ (%)				
		11,5	13,4	16,4	17,2	18,2
				(%)		
1	0	0,39	-0,92	1,00	0,83	0,82
2	0,2	0,39	-0,93	1,00	0,81	0,78
3	0,4	0,40	-0,90	1,00	0,82	0,73
4	0,6	0,43	-0,75	1,00	0,79	0,65
5	0,8	0,44	-0,55	1,00	0,75	0,52
6	1	0,73	X	1,00	0,67	0,23
7	2	0,71	X	1,00	0,72	-0,59
8	3	0,71	X	1,00	0,51	-0,98
9	4	0,67	X	0,99	0,51	-0,99
10	5	0,58	X	0,99	0,52	-0,97
11	6	0,00	X	0,98	0,50	-0,91
12	7	X	X	1,00	X	-1,00
13	8	X	X	X	X	X

X - oznacza nieokreślony współczynnik korelacji.

**Tabela 17.** Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziarniaków pszenicy i żyta o wilgotności  $w_{\%} = \text{const.}$ , w funkcji ciśnienia

**Table 17.** Correlation coefficients  $\rho$  vs. pressure for wheat and rye of moisture content  $w_{\%} = \text{const.}$

Lp.	p (Pa) x 98070	$\rho$ (%)				
		11,5	13,4	16,4	17,2	18,2
				(%)		
1	0	0,13	-0,79	0,92	0,98	0,97
2	0,2	0,06	-0,82	0,89	0,97	0,97
3	0,4	-0,05	-0,89	0,85	0,97	0,97
4	0,6	0,17	-0,94	0,78	0,96	0,96
5	0,8	-0,02	-0,96	0,65	0,95	0,95
6	1	-0,55	-0,94	0,95	0,95	0,93
7	2	-0,55	-0,86	0,88	0,99	0,96
8	3	-0,45	-0,85	0,93	0,99	0,98
9	4	-0,61	-0,73	0,95	0,98	0,99
10	5	X	X	0,85	0,97	0,98
11	6	X	X	0,87	0,92	0,95
12	7	X	X	X	X	1,00
13	8	X	X	X	X	X

Objaśnienia jak w Tabeli 16.



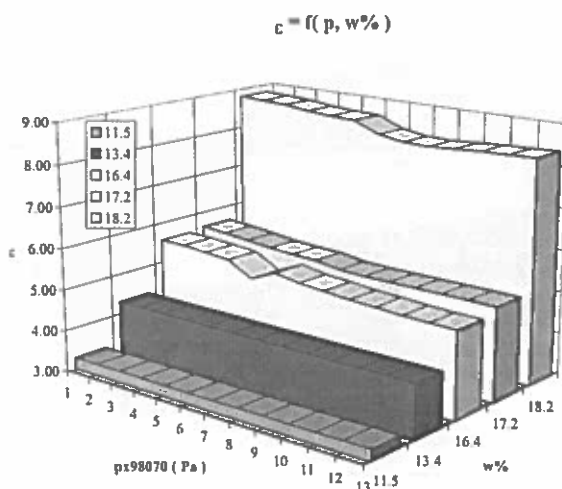
**Tabela 18.** Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziarniaków jęczmienia i żyta o wilgotności  $w_{\%} = \text{const.}$ , w funkcji ciśnienia

**Table 18.** Correlation coefficients  $\rho$  vs. pressure for barley and rye of moisture content  $w_{\%} = \text{const.}$

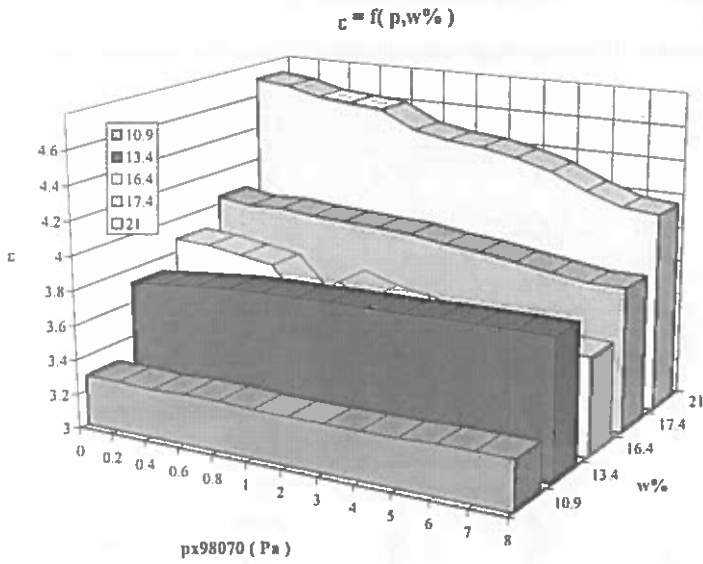
Lp.	p( Pa ) x 98070	$\rho$ (%)				
		11,5	13,4	16,4	17,2	18,2
1	0	-0,39	0,78	0,92	0,87	0,89
2	0,2	-0,41	0,75	0,89	0,87	0,87
3	0,4	-0,45	0,73	0,85	0,90	0,85
4	0,6	-0,60	0,68	0,77	0,90	0,80
5	0,8	-0,76	0,56	0,64	0,90	0,72
6	1	-0,75	X	0,95	0,87	0,57
7	2	-0,64	X	0,88	0,77	-0,37
8	3	-0,32	X	0,91	0,59	-0,94
9	4	-0,41	X	0,94	0,65	-0,99
10	5	X	X	0,84	0,71	-1,00
11	6	X	X	0,94	0,80	-0,99
12	7	X	X	X	1,00	-1,00
13	8	X	X	X	X	X

Objaśnienia jak w Tabeli 16.

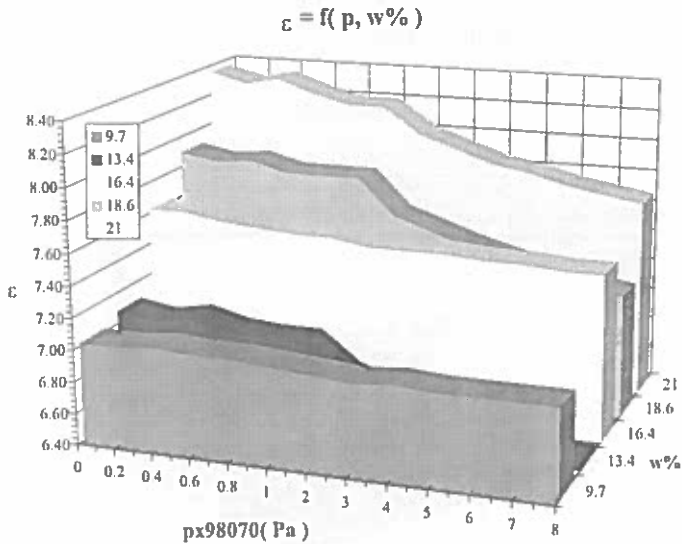
Na Rys. 32-34 przedstawiono zbiorcze histogramy zależności  $\varepsilon = f(p, w_{\%})$  dla ziarniaków: jęczmienia, pszenicy i żyta.



**Rys. 32.** Zależność przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia od ciśnienia przy  $w_{\%} = \text{const.}$   
**Fig. 32.** The dependence of grain dielectric constant for barley vs. pressure: at  $w_{\%} = \text{const.}$



Rys. 33. Zależność przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy od ciśnienia przy  $w_w = \text{const}$ .  
 Fig. 33. The dependence of grain dielectric constant for wheat vs. pressure: at  $w_w = \text{const}$ .



Rys. 34. Zależność przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta od ciśnienia przy  $w_w = \text{const}$ .  
 Fig. 34. The dependence of grain dielectric constant for rye vs. pressure: at  $w_w = \text{const}$ .

Na przykładzie ziarniaków pszenicy można wyjaśnić spadek przenikalności elektrycznej pod wpływem ciśnienia.

Jednym z istotnych parametrów wytrzymałościowych charakteryzujących ziarniaki zbóż jest współczynnik sprężystości podłużnej  $E$  [96]. Wynosi on dla ziarniaków pszenicy średnio  $1,3 \text{ GN m}^{-2}$  i jest jednakowy przy ściskaniu i rozciąganiu. Moduł Younga jest jednakowy dla ziarniaków o przełomie szklistym i mączystym i nie zależy od ich wymiarów.

Każde odkształcenie ziarniaka, podobnie jak innych ciał stałych, można przedstawić jako wynik nałożenia się odkształceń prostych. Do najprostszych, a jednocześnie podstawowych odkształceń należą: rozciąganie, ściskanie, zginanie oraz ścinanie.

Poniższe rozważania z uwagi na złożoność zagadnienia jakim jest oddziaływanie ciśnienia na ziarniak zostały ograniczone jedynie do przypadku ściskania podłużnego ziarniaka.

W stanie równowagi siły zewnętrzne i siły sprężystości są równe co do wartości. Prawo Hooke'a można wyrazić zależnością [27]:

$$p = E \frac{\Delta l}{l_p}, \quad (19)$$

gdzie:  $p$  - naprężenie wewnętrzne,  $E$  - moduł Younga,  $\Delta l$  - przyrost długości ziarniaka,  $l_p$  - długość początkowa ziarniaka.

Pod wpływem ściskania ziarniaków w kondensatorze pomiarowym ulega zmianie ich objętość na korzyść objętości zajmowanej przez powietrze. Przenikalność elektryczną zastępczą mieszaniny ziarniaki - powietrze można przedstawić następującą zależnością [83]:

$$\varepsilon_{z1} = \frac{\varepsilon_r V_r + \varepsilon_p V_p}{V_r + V_p}, \quad (20)$$

gdzie:  $\varepsilon_{z1}$  - przenikalność elektryczna zastępcza mieszaniny ziarniaki - powietrze przed sprężaniem,  $\varepsilon_r$  - przenikalność elektryczna ziarniaka,  $\varepsilon_p$  - przenikalność elektryczna powietrza,  $V_r$  - objętość ziarniaków w kondensatorze pomiarowym,  $V_p$  - objętość powietrza.

Po ściskaniu zależność (20) przybiera postać:

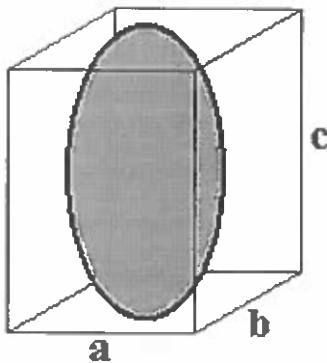
$$\varepsilon_{z2} = \frac{\varepsilon_r (V_r - \Delta V) + \varepsilon_p (V_p + \Delta V)}{V_r + V_p}, \quad (21)$$

gdzie:  $\Delta V$  - zmiana objętości ziarniaka na skutek ściskania,  $\varepsilon_{z2}$  - przenikalność elektryczna zastępcza mieszaniny ziarniaki - powietrze po sprężaniu.

Po przekształceniach wzór (21) przyjmuje postać:

$$\varepsilon_{z2} = \varepsilon_{z1} + \frac{(\varepsilon_p - \varepsilon_r)\Delta V}{V_r + V_p}, \quad (22)$$

W celu uproszczenia obliczeń przyjęto, że ziarniak można opisać prostopadłościanem o wymiarach:  $a$ ,  $b$  (wymiarzy podstawy),  $c$  - wysokość.



Rys. 35. Prostopadłościan opisujący ziarniak.  
Fig. 35. Rectangular prism simplifying a grain.

Przy powyższych założeniach objętość ziarniaków przed sprężaniem wynosi:

$$V_r = abc, \quad (23)$$

natomiast po sprężaniu możemy wyróżnić następujące hipotetyczne przypadki:

#### Przypadek 1

Zmniejszenie o  $\Delta c$  wysokości, przy niezmiennych wymiarach  $a$  i  $b$ .

$$V_{r1} = ab(c - \Delta c), \quad (24)$$

co po przekształceniach daje:

$$V_{r1} = V_r(1 - p/E) \quad (25)$$

$$\Delta V_1 = V_{r1} - V_r = -V_r p/E \quad (26)$$

Po podstawieniu zależności (25) do (22) otrzymujemy:

$$\varepsilon_{z2} = \varepsilon_{z1} + \frac{(\varepsilon_p - \varepsilon_r)V_r p}{E(V_r + V_p)} \approx \varepsilon_{z1} + \frac{(\varepsilon_p - \varepsilon_r)p}{E\left(1 + \frac{V_p}{V_r}\right)} \quad (27)$$

### Przypadek 2

Zmniejszenie wymiarów  $a$ ,  $b$ ,  $c$  odpowiednio o  $\Delta a$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta c$ .

$$V_{r2} = V_r(1 - p/E)^3 \quad (28)$$

$$\Delta V_2 = V_{r2} - V_r = V_r[(1 - p/E)^3 - 1] \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{z2} &= \varepsilon_{z1} + \frac{(\varepsilon_p - \varepsilon_r)[1 - (1 - p/E)^3]V_r}{(V_r + V_p)} \approx \\ &\approx \varepsilon_{z1} + \frac{(\varepsilon_p - \varepsilon_r)[1 - (1 - p/E)^3]}{\left(1 + \frac{V_p}{V_r}\right)} \end{aligned} \quad (30)$$

### Przypadek 3

Zmniejszenie wymiaru  $c$  o  $\Delta c$  z jednoczesnym wzrostem wymiarów  $a$  i  $b$  odpowiednio o  $\Delta a$  i  $\Delta b$ .

$$V_{r3} = V_r(1 - p/E)(1 + p/E)^2 \quad (31)$$

$$\Delta V_3 = V_{r3} - V_r = V_r[(1 - p/E)(1 + p/E)^2 - 1] \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{z2} &= \varepsilon_{z1} + \frac{(\varepsilon_p - \varepsilon_r)[1 - (1 - p/E)(1 + p/E)^2]V_r}{(V_r + V_p)} \approx \\ &\approx \varepsilon_{z1} + \frac{(\varepsilon_p - \varepsilon_r)[1 - (1 - p/E)(1 + p/E)^2]}{\left(1 + \frac{V_p}{V_r}\right)} \end{aligned} \quad (33)$$

Na podstawie zmierzonych objętości ziarniaków pszenicy i powietrza w kondensatorze pomiarowym korzystając z formuły (8) [83] określono przenikalność elektryczną ziarniaków. Dla ziarniaków pszenicy o wilgotności  $w\% = 21\%$  przenikalność elektryczna, wyznaczona w oparciu o formułę (8), wynosi:  $\epsilon_{\rho} = 6,89$ . Moduł Young'a dla ziarniaków pszenicy wynosi średnio  $E = 1,3 \text{ GN m}^{-2}$  [96].

W przypadku ściskania ziarniaków pszenicy o wilgotności  $w\% = 21\%$  do ciśnienia 784560 Pa otrzymano następujące zmiany przenikalności mieszaniny ziarniaki - powietrze:

#### Przypadek 1

$$\epsilon_{z1} = 4,710 \rightarrow \epsilon_{z2} = 4,707 \quad \Delta\epsilon\% = -0,06\%$$

#### Przypadek 2

$$\epsilon_{z1} = 4,710 \rightarrow \epsilon_{z2} = 4,703 \quad \Delta\epsilon\% = -0,15\%$$

#### Przypadek 3

$$\epsilon_{z1} = 4,710 \rightarrow \epsilon_{z2} = 4,712 \quad \Delta\epsilon\% = 0,04\% .$$

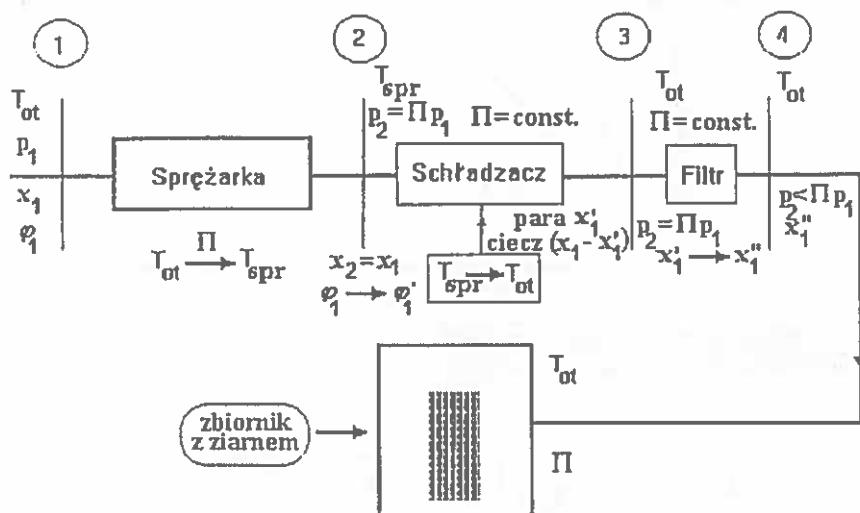
Obliczenia podane według przypadków 1 i 2 potwierdzają charakter zmian przenikalności elektrycznej pod wpływem ciśnienia. Porównując otrzymany tu wynik z wynikiem pomiaru (Tabela 7) widać jednak znaczną rozbieżność między nimi.

Rozbieżność ta może wynikać z niedoskonałości formuły (8), ponadto zastosowane tu prawo Hooke'a przy tej wartości ciśnienia wywieranego na ziarniaki może tracić zastosowanie w związku z zakłóceniem proporcjonalności naprężenia i odkształcenia. Założono tu ponadto wpływ tylko zmiany wymiarów ziarniaka, na skutek ściskania, na jego przenikalność elektryczną. Ziarniak jako struktura warstwowa jest zbudowany z warstw o różnym składzie chemicznym i gęstości, których to przenikalności mogą się pod wpływem ciśnienia zmieniać w sposób, którego nie obejmują powyższe formuły. W przeprowadzonych tu rozważaniach nie uwzględniono również wzajemnych oddziaływań ziarniaków na siebie, których opis matematyczny byłby bardzo skomplikowany z uwagi na ich losowe umieszczenie w kondensatorze, jak i późniejsze usytuowanie w miarę sprężania.

Eksperyment przeprowadzono w ten sposób żeby proces sprężania był prowadzony w warunkach suchych. Poniżej został omówiony proces sprężania dielektryka niejednorodnego (ziarniaków). Na diagramie (Rys. 36) jest przedstawiony proces sprężania powietrza w zbiorniku od ciśnienia  $p_1 = 0,1 \text{ MPa}$ ,

przy temperaturze  $T_1 = 293 \text{ K}$  oraz wilgotności względnej powietrza  $\varphi = 0,6$  co odpowiadało warunkom pomiarów:

gdzie:  $T_{ot}$ ,  $T_{spr}$  - odpowiednio temperatura otoczenia i sprężania,  $\varphi$  - wilgotność względna,  $x$  - zawartość wilgoci,  $p_0$ ,  $p$  - odpowiednio ciśnienie przed i po sprężaniu,  $\Pi$  - spręż.



Rys. 36. Omówienie procesu sprężania dielektryka niejednorodnego w cylindrze ciśnieniowym.  
Fig. 36. Compression process of ununiform dielectric in a pressure vessel.

Podstawą rozwiązania zagadnienia sprężania dielektryka niejednorodnego (ziarniaków) jest wykres  $i - x$  Molliera [26].

Proces sprężania powietrza od parametrów (Rys. 37):

$$p_1 \approx 1 \text{ (bar)} = 0,1 \text{ (MPa)},$$

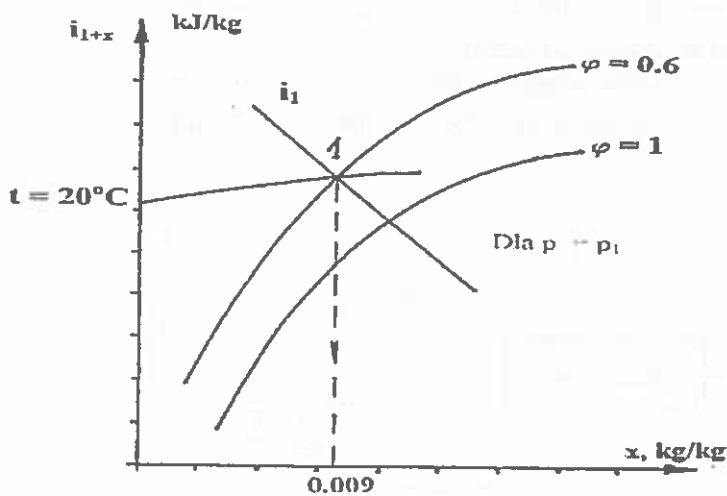
$$t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}, \varphi_1 = 0,60, x_1 = 0,009 \text{ (kg}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ kg}^{-1}), i'_1 = 42,5 \text{ (kg kg}^{-1}),$$

$$\text{do } p_2 = 8 \text{ (bar)} = 0,8 \text{ (MPa)}.$$

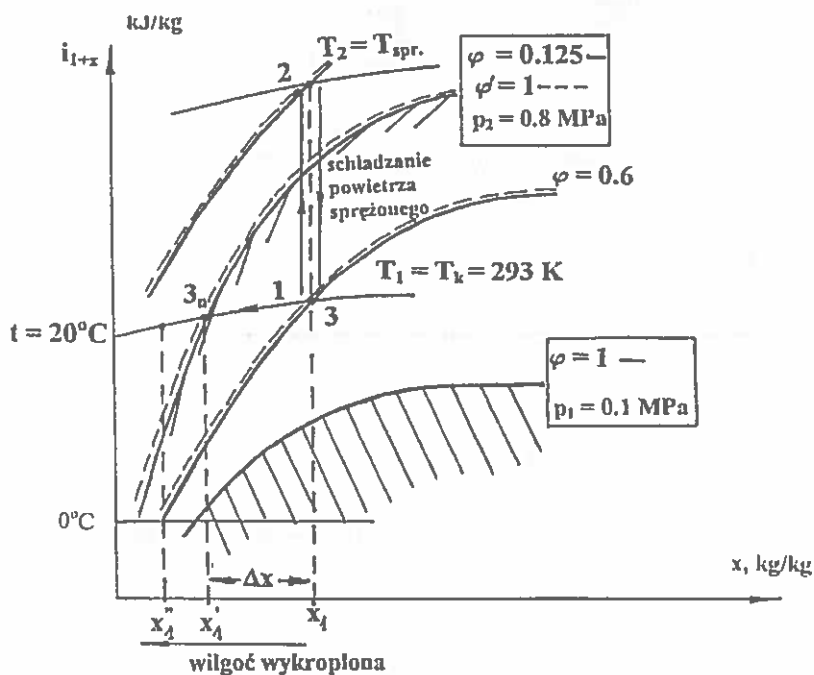
gdzie:  - obszar powietrza przesyconego (w starych warunkach),

 - obszar powietrza przesyconego (po sprężaniu - w nowych warunkach).

Proces sprężania (adiabaticzny) zachodzi przy wykładniku adiabaty  $k = 1,399$  (odczytanym z wykresu na Rys. 39), dla takiego sprężania, przy:  $\Pi = p_2/p_1 = 8$  i odczytanego z nomogramu z przecięcia z prostą łączącą punkty  $p_2/p_1 = 8$  i  $n = 1,4$  stosunku  $T_2/T_1 = 1,8$  (Rys. 40).

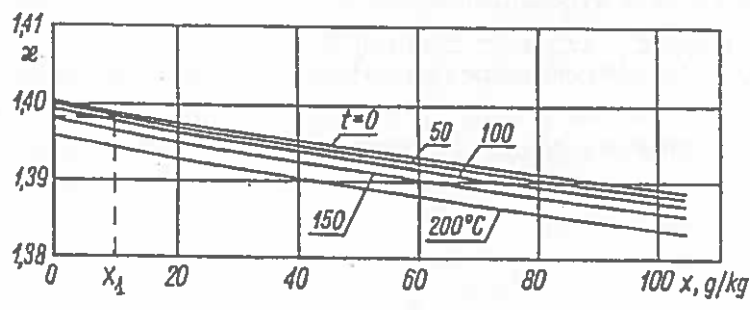


Rys. 37. Początkowe parametry procesu sprężania.  
Fig. 37. Initial parameters of compression process.

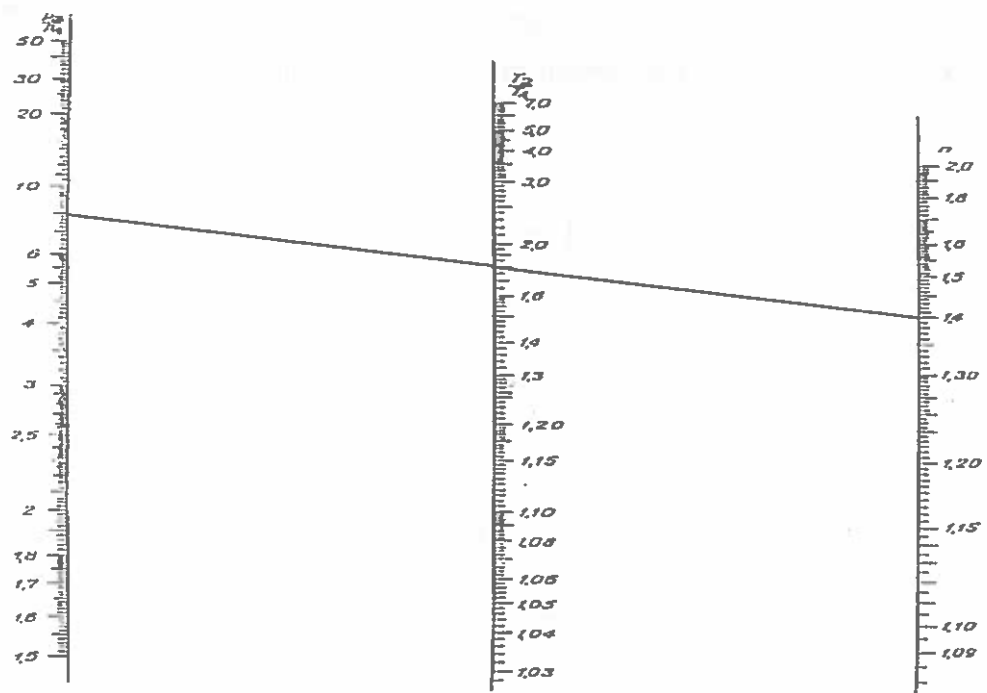


Rys. 38. Proces sprężania dielektryka niejednorodnego.  
Fig. 38. Compression process of an ununiform dielectric.





Rys. 39. Wykładnik adiabaty dla nienasyconego, wilgotnego powietrza.  
 Fig. 39. Adiabatic curve exponent for unsaturated wet air.



Rys. 40. Nomogram dla przemiany politropowej ( $p_2/p_1=1,5 \div 50$ ;  $T_2/T_1=1,03 \div 70$ ;  $n=1,08 \div 2$ ).  
 Fig. 40. Nomogram for polytropic process ( $p_2/p_1=1,5 \div 50$ ;  $T_2/T_1=1,03 \div 70$ ;  $n=1,08 \div 2$ ).

Oznacza to, że po sprężaniu temperatura wzrośnie do  $T_2 \approx 528 \text{ K}$  czyli  $t_2 = 254,6^\circ \text{C}$ . W procesie sprężania zawartość wilgoci pozostaje bez zmian  $x_2 = x_1 = \text{const}$ . Dla ciśnienia  $p_2 = 0,8 \text{ MPa}$  otrzymuje się z wykresu  $i-x$  wartość krzywej nasycenia  $\varphi = 0,125$ . Podwyższy się również krzywa nasycenia (w nowych warunkach). Ochłodzenie sprężonego powietrza do temperatury początkowej  $t_1 = 20^\circ \text{C}$  zapewni osiągnięcie stanu w obszarze mgły. Po schłodzeniu sprężonego powietrza otrzymujemy stałą gazową:

$$R'_n = \frac{x'_1 R_{\text{H}_2\text{O}}}{1 + x'_1} + R_s \frac{1}{1 + x'_1} = 287,3 \left( \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right), \quad (34)$$

- dla  $x'_1 = 0,002 \text{ (kg}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{kg}_{\text{pow. such.}})$  - przed pochłaniaczem wilgoci.

Objętość powietrza w zbiorniku z pszenicą:

$$V_o = V_{zb.} - V_{ziar.} = 28,4 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^3\text{)} \quad (35)$$

Masa wody wprowadzona ze sprężonym powietrzem (bez pochłaniacza wilgoci):

$$m''_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{x'_1}{1 + x'_1} m'_m = 5,38 \cdot 10^{-6} \text{ (kg)}, \text{ gdzie:} \quad (36)$$

$$m'_m = \frac{\Pi p_1 V_o}{R'_m T_{20^\circ \text{C}}} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ (kg)} \quad (37)$$

Dla  $x''_1 = 0,0015 \text{ (kg}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{kg}_{\text{pow. such.}})$  (z pochłaniaczem wilgoci) - przy założeniu  $x''_1 = 0,75 x'_1$  (najmniejsza wydajność filtra) otrzymujemy ze wzoru (34):

$$R''_m = 287,2 \left( \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right)$$

$$m''_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{x''_1}{1 + x''_1} m''_m = 4,04 \cdot 10^{-6} \text{ (kg)}, \text{ gdzie:}$$

$$m''_m = \frac{\Pi p_1 V_o}{R''_m T_{20^\circ \text{C}}} = 2,69 \cdot 10^{-3} \text{ (kg)}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} < m''_{\text{H}_2\text{O}}.$$

Masa wody w ziarnie przed sprężaniem:

$$m''_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{w}{100} m_z = 0,00436, \text{ (kg)}. \quad (38)$$

Masa wody w ziarnie po sprężaniu do 0,8 MPa bez pochłaniacza:

$$m_{\text{H}_2\text{O}}^{**z} = 0,004365, \text{ (kg) - co wprowadza błąd } 0,1 \text{ \%}.$$

Masa wody w ziarnie po sprężaniu do 0,8 MPa z pochłaniaczem wilgoci:

$$m_{\text{H}_2\text{O}}^{**z} = 0,004363, \text{ (kg) - co wprowadza błąd } 0,09 \text{ \%},$$

gdzie:  $w\%$  - wilgotność ziarna przed sprężaniem,  $m_z$  - masa ziarna.

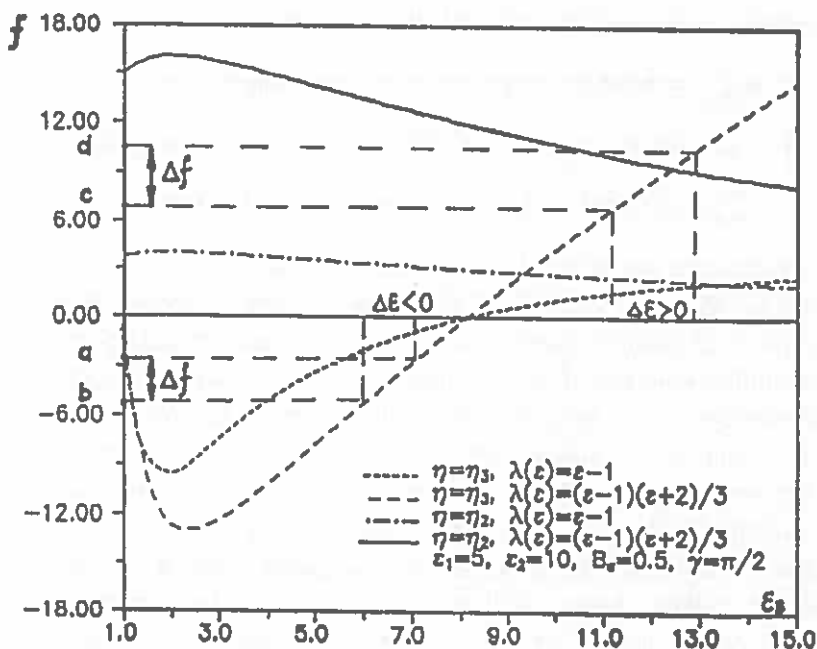
Jak widać sprężanie do ciśnienia 0,8 MPa spowodowało wzrost masy wody widoczny dopiero na szóstym miejscu po przecinku, a zastosowanie pochłaniacza jeszcze zminimalizowało ten efekt. O znikomym wpływie wilgotności świadczy również fakt zmniejszenia się przenikalności elektrycznej ziarniaków po sprężeniu w stosunku do stanu przed sprężeniem. W związku z dużą wartością stałej dielektrycznej wody  $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} \approx 80$ , w przypadku znacznego jej wpływu w tych badaniach, przenikalność elektryczna wzrosłaby. Wyniki pomiarów znajdują potwierdzenie w obliczeniach przedstawionych przez Barana w pracy [9]. Przeprowadzone przez niego obliczenia dotyczyły m.in. zależności sił elektrostrykcyjnych od stałych dielektrycznych warstw modelu ziarniaka. Wpływ odkształceń dielektryka wywołujących zmiany gęstości na wielkość efektów strykcyjnych reprezentuje funkcja  $\lambda(\epsilon) = \tau \frac{\partial \epsilon}{\partial \tau}$ . Funkcja ta wpływa w jednakowy sposób na wartość sił w każdym punkcie jednorodnej warstwy i odgrywa rolę decydującą. Dlatego charakter zmian gęstości sił w funkcji przenikalności elektrycznej warstwy jest podobny w całym jej obszarze. Na Rys. 41 [9] przedstawiona została zależność funkcji  $f$  (proporcjonalnej do siły elektrostrykcyjnej) od przenikalności elektrycznych warstw w punktach  $\eta = \eta_1$  i  $\eta = \eta_2$  leżących na osi sferoidy.

Dla dielektryka niejednorodnego można siłę elektrostrykcyjną przedstawić zależnością:

$$f_t = \frac{1}{2} \epsilon_0 \tau \frac{\partial \epsilon}{\partial \tau} \nabla E^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \lambda(\epsilon) \nabla E^2 \quad (39)$$

Przykładowo dla zmian gęstości sił w granicach oznaczonych na Rys. 41 punktami (a, b) -  $\Delta \epsilon < 0$ , a dla zmian odpowiadających punktom (c, d) -  $\Delta \epsilon > 0$ .

O wielkości sił elektrostrykcyjnych decyduje zależność  $\epsilon$  od odkształceń wywołujących lokalne zmiany gęstości dielektryka oraz niejednorodność rozkładu pola.



Rys. 41. Gęstość siły  $f$  w punktach zewnętrznej i środkowej warstwy w funkcji  $\varepsilon_3$  dla różnych zależności  $\lambda(\varepsilon)$ ;  $\theta = 0$  [9].

Fig. 41. Force  $f$  density in points of external and internal layers vs.  $\varepsilon_3$  at different  $\lambda(\varepsilon)$ ;  $\theta = 0$  [9].

Ze względu na  $\lambda(\varepsilon)$  dokonano klasyfikacji ziarniaków do różnych grup dielektryków [69]. Badania materiałów ziarnistych [9,69], wykazały zależność przenikalności elektrycznej od gęstości masy typu 3 i 4 (Tabela 19).

Przyjmując za wymuszenie naprężenia mechaniczne, można na podstawie Rys. 41 wnioskować, że kierunek zmian przenikalności zależy od rodzaju naprężeń:

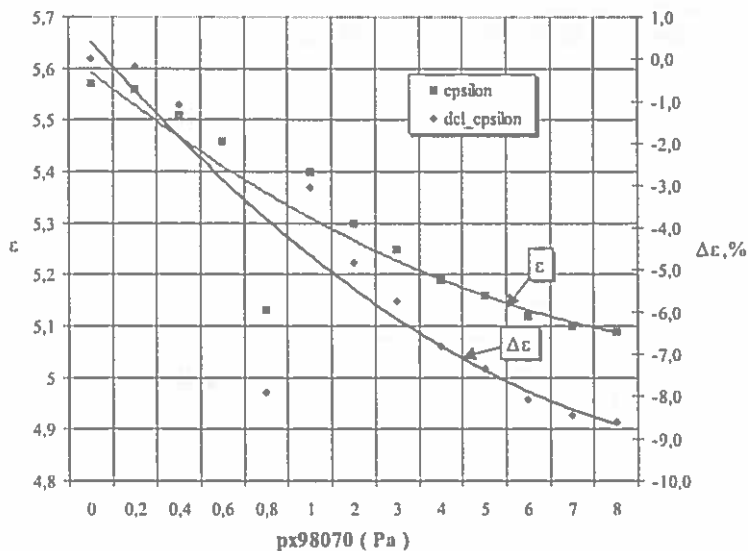
- wraz ze wzrostem naprężeń ściskających przenikalność maleje;
- z kolei ze wzrostem naprężeń rozciągających przenikalność wzrasta.

Z punktu widzenia sił strykcyjnych ziarniaki zbóż należy sklasyfikować do materiałów wykazujących zależność przenikalności od gęstości masy typu 1 i 2 (Tabela 19), co przeczy sugestiom podanym w pracach [9,69], klasyfikującym je do grupy 3 i 4.

W oparciu o przeprowadzone pomiary i obliczenia przedstawiono na Rys. 42÷47 wspólne wykresy zależności przenikalności elektrycznej  $\varepsilon$  oraz procentowej zmiany  $\Delta\varepsilon$  od ciśnienia dla badanych ziarniaków zbóż.

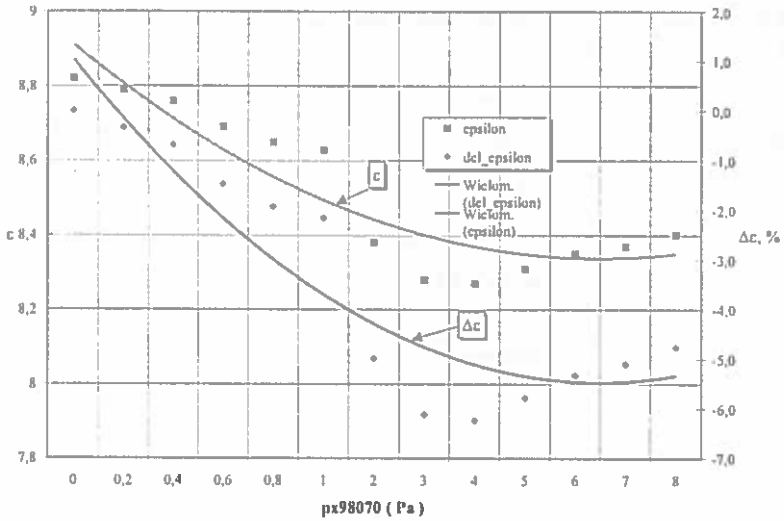
T a b e l a 19. Zależność przenikalności elektrycznej dielektryków od gęstości masy  
 T a b l e 19. Grain classification

Lp.	$\varepsilon(\tau)$	$\lambda(\varepsilon) = \tau \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau}$
1	$\varepsilon = m\tau$	$\varepsilon - 1$
2	$(\varepsilon - 1)/(\varepsilon + 2) = m\tau$	$(\varepsilon - 1)/(\varepsilon + 2) / 3$
3	$\varepsilon = (m\tau + 1)^2$	$2 \cdot (\varepsilon - \varepsilon^{1/2})$
4	$\varepsilon = (m\tau + 1)^3$	$3 \cdot (\varepsilon - \varepsilon^{2/3})$



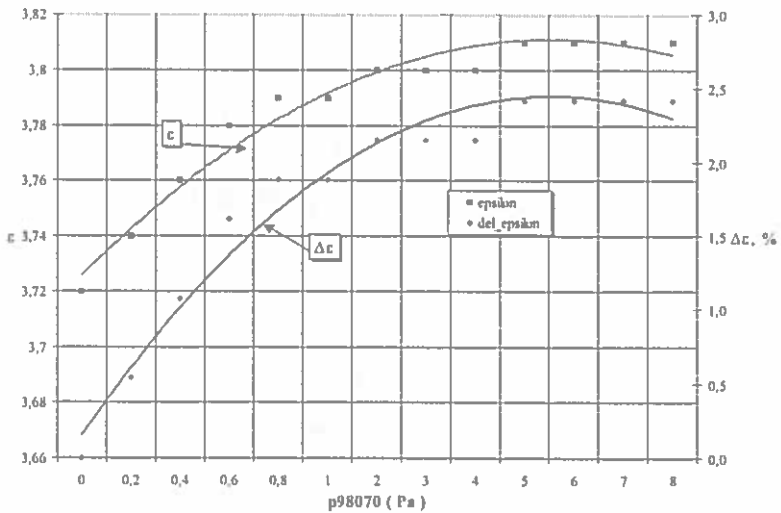
Rys. 42. Zależność przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia oraz jej procentowej zmiany  $\Delta\varepsilon$  od ciśnienia przy  $w_w = 16,4\%$ .

Fig. 42. The dependence of dielectric constant for barley and its percentage change  $\Delta\varepsilon$  vs. pressure at  $w_w = 16.4\%$ .



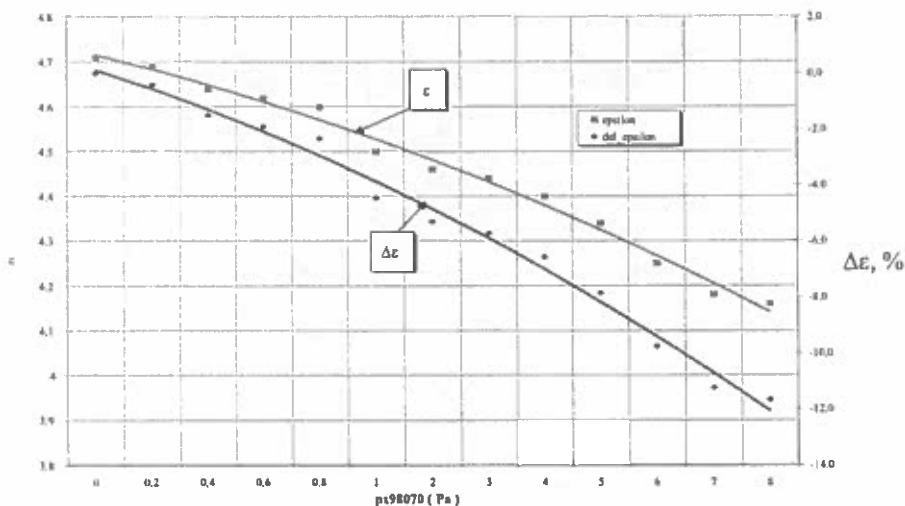
Rys. 43. Zależność przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia oraz jej procentowej zmiany  $\Delta\epsilon$  od ciśnienia przy  $w_{\%} = 18,2\%$ .

Fig. 43. The dependence of dielectric constant for barley and its percentage change  $\Delta\epsilon$  vs. pressure at  $w_{\%} = 18.2\%$ .



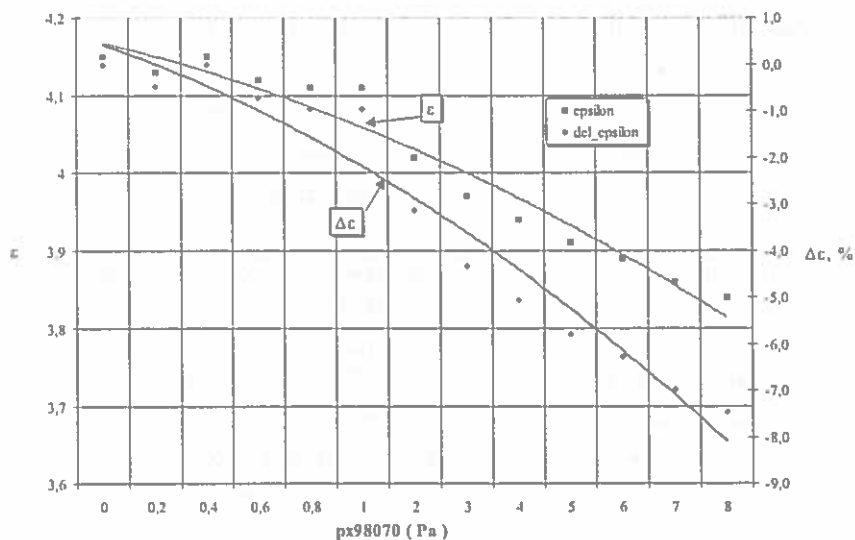
Rys. 44. Zależność przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy oraz jej procentowej zmiany  $\Delta\epsilon$  od ciśnienia przy  $w_{\%} = 13,4\%$ .

Fig. 44. The dependence of dielectric constant for wheat and its percentage change  $\Delta\epsilon$  vs. pressure at  $w_{\%} = 13.4\%$ .



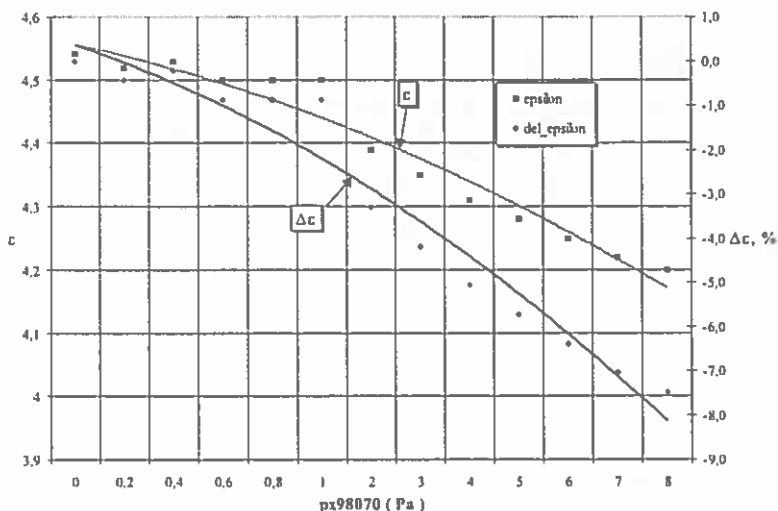
Rys. 45. Zależność przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy oraz jej procentowej zmiany  $\Delta\epsilon$  od ciśnienia przy  $w\% = 21\%$ .

Fig. 45. The dependence of dielectric constant for wheat and its percentage change  $\Delta\epsilon$  vs. pressure at  $w\% = 21\%$ .



Rys. 46. Zależność przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta oraz jej procentowej zmiany  $\Delta\epsilon$  od ciśnienia przy  $w\% = 13,4\%$ .

Fig. 46. The dependence of dielectric constant for rye and its percentage change  $\Delta\epsilon$  vs. pressure at  $w\% = 13.4\%$ .



Rys. 47. Zależność przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta oraz jej procentowej zmiany  $\Delta\epsilon$  od ciśnienia przy  $w_{\%} = 18,6\%$ .

Fig. 47. The dependence of dielectric constant for rye and its percentage change  $\Delta\epsilon$  vs. pressure at  $w_{\%} = 18,6\%$ .

### 6.2.6. Wnioski z badań przenikalności elektrycznej ziarniaków w funkcji naprężeń mechanicznych

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

- wartość przenikalności elektrycznej ziarniaka zależy od naprężeń mechanicznych (Tabela 4-9, Rys. 17-31);
- zmiana przenikalności elektrycznej ziarniaków zależy od ich wilgotności;
- przeprowadzone pomiary i rozważania (Rys. 41) pozwalają przypuszczać, że ziarniaki zbóż należy sklasyfikować do materiałów wykazujących zależność przenikalności od gęstości masy typu 1 i 2. Przy wzroście naprężeń ściskających przenikalność elektryczna ziarniaków maleje (tym silniej im większa była ich wilgotność). W Tabelach 10-15 procentowa zmiana przenikalności elektrycznej  $D\epsilon$  oznaczona znakiem ( - ) odpowiada spadkowi wartości przenikalności elektrycznej, brak znaku ( - ) oznacza wzrost przenikalności elektrycznej;
- przy ściskaniu ziarniaków (do ciśnienia 784560 Pa) otrzymano zmniejszenie średniej przenikalności elektrycznej: dla ziarniaków jęczmienia o wilgotności  $w_{\%} = 16,4\%$ , maksymalne  $\Delta\epsilon = -8,6\%$  (Rys. 42), dla ziarniaków o wilgotności



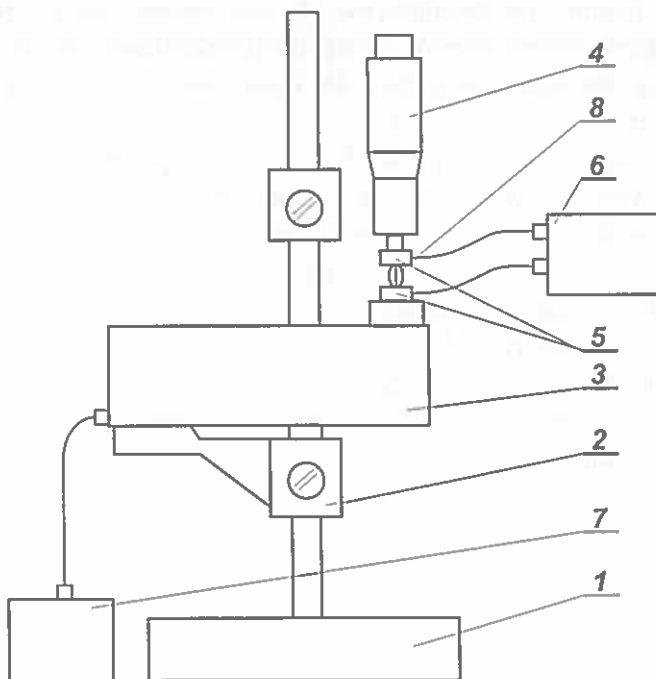
- $w_{\%} = 18,2 \%$  maksymalny spadek przenikalności elektrycznej  $\Delta\epsilon = -6,2 \%$ , występuje dla ciśnienia 588420 Pa (Rys. 43);
- w przypadku ściskania (do ciśnienia 784560 Pa) ziarniaków pszenicy otrzymano, dla ziarniaków o wilgotności  $w_{\%} = 13,4 \%$ , wzrost przenikalności elektrycznej  $\Delta\epsilon = 2,4 \%$  (Rys. 44);
  - dla pozostałych badanych wilgotności przenikalność pszenicy maleje wraz ze wzrostem ciśnienia. Maksymalny spadek  $\Delta\epsilon = -11,7 \%$  występuje dla ziarniaków o wilgotności  $w_{\%} = 21\%$  (Rys. 45) przy ciśnieniu 784560 Pa;
  - dla żyta otrzymano maksymalne spadki przenikalności elektrycznej dla ziarniaków o wilgotności  $w_{\%} = 13,4 \%$ ,  $\Delta\epsilon = -7,5 \%$  (Rys. 46) oraz wilgotności  $w_{\%} = 18,6 \%$ ,  $\Delta\epsilon = -7,5 \%$  (Rys. 47), przy sprężaniu do ciśnienia 784560 Pa;
  - na podstawie wyników obliczeń współczynników korelacji, podanych w Tabelach 16-18, wiążących zmiany przenikalności elektrycznej wywołane ciśnieniem z gatunkami zboża stwierdzono silne (dodatnie) związanie dla ziarniaków jęczmienia i pszenicy o wilgotności  $w_{\%} = 16,4 \%$  (współczynnik korelacji  $\rho_{x,y} \approx 1$  w całym zakresie zmian ciśnienia), natomiast dla ziarniaków wyżej wymienionych zbóż istnieje silna korelacja ujemna dla wilgotności  $w_{\%} = 13,4\%$  (w przedziale zmian ciśnienia  $< 0, 78456 >$ ; Pa) i  $w_{\%} = 18,2\%$  ( w przedziale zmian ciśnienia  $< 196140, 686490 >$ ; Pa). W przypadku ziarniaków pszenicy i żyta najsilniejsze (dodatnie) związanie występuje dla wilgotności  $w_{\%} = 17,2 \%$  i  $w_{\%} = 18,2\%$ . Natomiast korelacje ujemne występują dla ziarniaków o wilgotnościach  $w_{\%} = 11,5 \%$  i  $w_{\%} = 13,4 \%$ . W przypadku ziarniaków jęczmienia i żyta korelacje ujemne występują dla ziarniaków o wilgotnościach  $w_{\%} = 11,5 \%$  i  $w_{\%} = 18,2 \%$ , a korelacje dodatnie dla wilgotności: 13,4; 16,4% (najsilniejsze dodatnie związanie) i 17,2%.
  - badania laboratoryjne potwierdziły otrzymaną drogą analityczną przez Barana [9] charakter zmian przenikalności elektrycznej ziarniaków poddanych działaniu naprężeń mechanicznych.

### 6.3. Pomiar rezystancji nasion zbóż w funkcji naprężeń mechanicznych

#### 6.3.1. Opis stanowiska do pomiaru rezystancji nasion zbóż w funkcji naprężeń mechanicznych

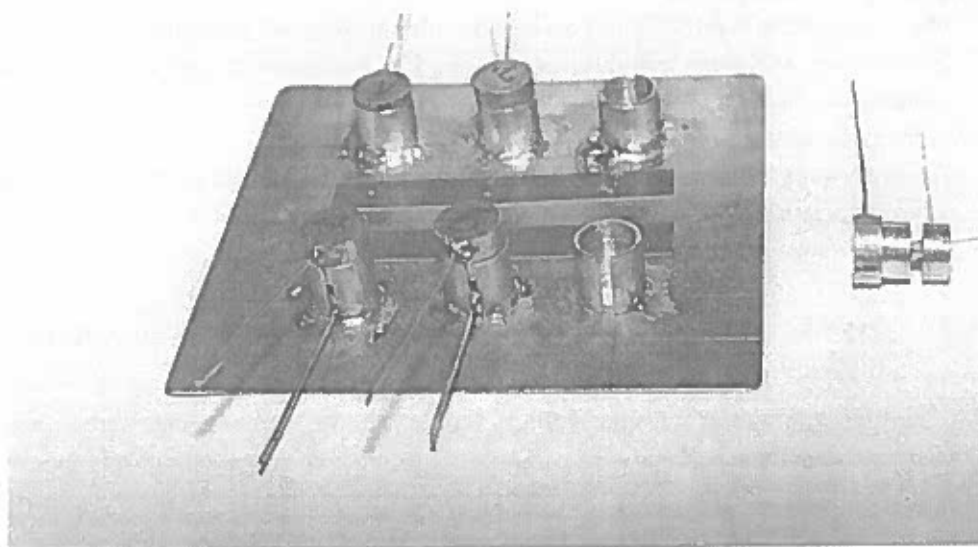
Do wytwarzania określonych naprężeń mechanicznych wykonano prototypową maszynę wytrzymałościową - mikrozrywarękę (Rys. 48) [1].

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 (Rys. 49). Odpowiednią trwałość umocowania i możliwość elektrycznych połączeń uzyskano stosując klej przewodzący.



Rys. 48. 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 ].

Fig. 48. Test stand: 1 - support, 2 - force converter handle, 3 - force converter, 4 - pressure holder, 5 - electrodes, 6 - resistance measuring system, 7 - force measuring system, 8 - grain glued to electrodes [1].



Rys. 49. Widok uchwytów do mocowania i wklejania ziarniaków [1].  
 Fig. 49. Grain holders [1].

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

### 6.3.2. Metodyka pomiaru rezystancji ziarniaków w funkcji naprężeń mechanicznych

#### I. Przygotowanie komory klimatyzacyjnej

- Wyregulowano w komorze zadaną wartość temperatury i wilgotności. Zależność wilgotności ziarniaka ( $w_{\%z}$ ) od wilgotności powietrza ( $w_{\%}$ ) przedstawiono w Tabeli 2 [81].

#### II. Przygotowanie materiału badanego

- Przeprowadzono selekcję ziaren zbóż na sitach selekcyjnych.
- Umieszczono ziarna w komorze klimatyzacyjnej na określony czas ( $\tau \approx 72$ h).
- Określono wilgotność ziarna po pobycie w komorze klimatyzacyjnej przy wykorzystaniu miernika wilgotności (wykorzystano miernik GRAINER II PM-300, KETT Grain Moisture Tester).

### III. Przygotowanie próbek

- Po wyjęciu materiału roślinnego z komory klimatyzacyjnej przygotowano próbki pomiarowe: wklejono ziarniaki za pomocą kleju przewodzącego do uchwytów pomiarowych (Rys. 49).

### IV. Przeprowadzenie pomiarów

- Wywoływano w ziarniaku naprężenia zewnętrzną siłą ściskającą lub rozciągającą (za pomocą urządzenia dociskowego 4).
- Przeprowadzano pomiar siły oraz rezystancji ziarniaka.

### 6.3.3. Wyniki pomiarów rezystancji ziarniaków w funkcji naprężeń mechanicznych

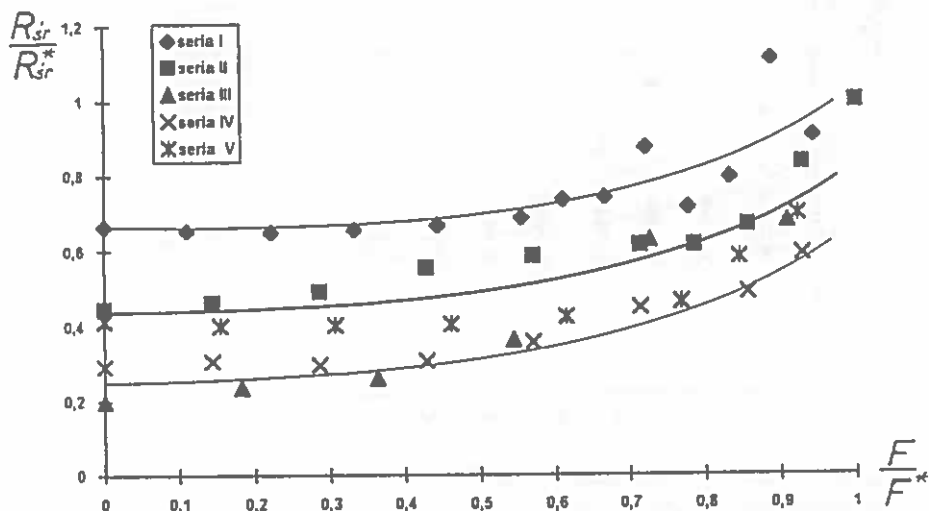
Wyniki pomiarów rezystancji ziarniaków w funkcji sił rozciągających oraz wykres rezystancji ziarniaka w funkcji sił rozciągających zostały przedstawione w Tabeli 20 i na Rys. 50, natomiast wyniki pomiarów rezystancji ziarniaków w funkcji sił ściskających w Tabeli 21 i na Rys. 51.

**Tabela 20.** Wyniki pomiaru rezystancji ziarniaka w funkcji siły rozciągającej,  $w_{\%} = 14\%$ ,  $T = 293\text{ K}$  [1]

**Table 20.** Test results of grain resistance vs. tension force at  $w_{\%} = 14\%$ ,  $T = 293\text{ K}$  [1]

Lp.	Siła rozciągająca		$R_{\dot{s}r}$ (GΩ)	$\delta_n$	$R_{\dot{s}r} / R^*_{\dot{s}r}$
	F (N)	F/F*			
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*	*	*	*	*

Objaśnienia:  $F$  - 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 próbki,  $\delta_n$  - odchylenie standardowe dla danej serii pomiarów.

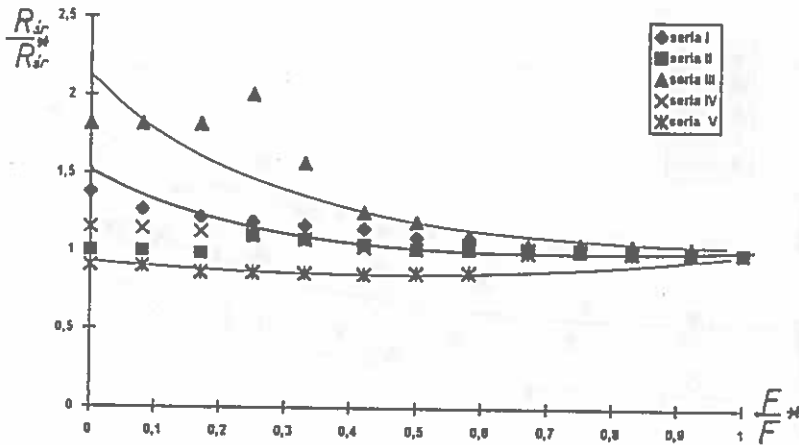


Rys. 50. Zależność rezystancji ziarniaka w funkcji siły rozciągającej:  $R_{sr}^*$  – wartość rezystancji ziarniaka uzyskana tuż przed zniszczeniem próbki,  $F^*$  – wartość siły, przy której wszystkie próbki w serii uległy zniszczeniu [1].

Fig. 50. The dependence of grain resistance vs. tension force:  $R_{sr}^*$  – grain resistance value obtained before sample destruction,  $F^*$  – force at which all samples in a series were destroyed [1].

Tabela 21. Wyniki pomiaru rezystancji ziarniaka w funkcji siły ściskającej,  $w_z = 14\%$ ,  $T = 293\text{ K}$  [1]  
 Table 21. Test results of grain resistance vs. pressure force at  $w_z = 14\%$ ,  $T = 293\text{ K}$  [1]

Lp.	Siła ściskająca		$R_{sr}$ (GΩ)	$\delta_n$	$R_{sr} / R_{sr}^*$
	F (N)	F/F*			
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. 51. Zależność rezystancji ziarniaka w funkcji siły ściskającej [1].

Fig. 51. Grain resistance vs. pressing force [1].

#### 6.3.4. Wnioski z badań rezystancji ziarniaków w funkcji naprężeń mechanicznych

Na podstawie wyników badań rezystancji ziarniaka poddanego działaniu sił rozciągających oraz ściskających stwierdzono (Rys. 50 i 51 oraz Tabeli 20 i 21):

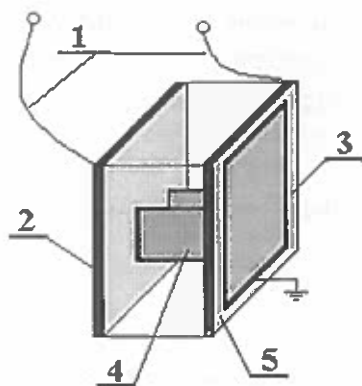
- wartość rezystancji ziarniaka zależy od sił rozciągających,
- w początkowej fazie rozciągania  $F=0 \div 6$  N rezystancja nie zmienia swojej wartości,
- przy wyższych wartościach sił rozciągających  $F > 6$  N wartość rezystancji rośnie ze wzrostem siły (Tabela. 20). Wzrost rezystancji ma w przybliżeniu 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 (Tabela 21),
- w ostatniej fazie ściskania  $40 \text{ N} < F < 60 \text{ N}$  przyrost rezystancji ziarniaka jest niewielki i wynosi 4 %.

## 6.4. Pomiar przenikalności elektrycznej nasion zbóż w funkcji natężenia pola elektrostatycznego

### 6.4.1. Opis stanowiska do pomiaru przenikalności elektrycznej nasion zbóż w funkcji natężenia pola elektrostatycznego

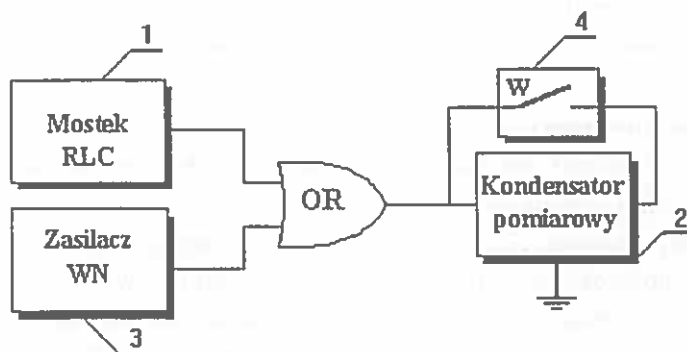
Do wytwarzania pola elektrostatycznego zaprojektowano i wykonano komorę pomiarową (kondensator, Rys. 52).

Schemat układu do pomiaru przenikalności elektrycznej ziarniaka w polu elektrostatycznym pokazano na Rys. 53.



Rys. 52. Widok kondensatora płaskiego: 1 - przewody kondensatora pomiarowego, 2,3 - okładki kondensatora pomiarowego, 4 - komora na ziarniaki zbóż, 5 - ekran.

Fig. 52. Flat capacitor: 1 - measuring capacitor leads, 2,3 - measuring capacitor plates, 4 - grain chamber, 5 - screen.



Rys. 53. Schemat układu do pomiaru przenikalności elektrycznej ziarniaków zbóż w polu elektrostatycznym: 1 - mostek RLC, 2 - kondensator pomiarowy ( płaski ), 3 - zasilacz WN prądu stałego ( z miernika izolacji ), 4 - wyłącznik W, OR - podłączenie kolejno zasilacza WN, a następnie mostka RLC.

Fig. 53. Dielectric constant measuring system for grains in electric field: 1 - RLC bridge, 2 - measuring capacitor (flat), 3 - WN dc supplier (from insulation meter), 3 - switch W, OR.

Komorę tworzą okładki kondensatora płaskiego (2). Do okładek przykładane jest napięcie z zasilacza wysokiego napięcia WN (4).

Wartość natężenia pola elektrostatycznego jest określana na podstawie zależności:

$$E = U/d, \quad (40)$$

gdzie: E - natężenie pola elektrostatycznego,  $\text{kV m}^{-1}$ ; U - napięcie przyłożone do okładek kondensatora, kV; d - odległość między okładkami kondensatora, m.

Wewnątrz kondensatora pomiarowego umieszczony jest badany dielektryk (ziarniaki zbóż). Do pomiaru przenikalności elektrycznej wykorzystano mostek RLC typu E318 (1). Wyłącznik W służy do rozładowania kondensatora po odłączeniu napięcia, w celu uniknięcia uszkodzenia mostka pomiarowego. Ponieważ nie jest możliwy pomiar mostkiem RLC, gdy kondensator jest zasilany z zasilacza wysokiego napięcia WN był on podłączany naprzemiennie z zasilaczem WN. Na Rys. 53 procedura ta została oznaczona symbolem OR (lub).

#### **6.4.2. Metodyka pomiaru przenikalności elektrycznej nasion zbóż w funkcji natężenia pola elektrostatycznego**

##### **I. Przygotowanie komory klimatyzacyjnej.**

- Wyregulowano w komorze zadaną wartość temperatury i wilgotności.

##### **II. Przygotowanie materiału badawczego.**

- Materiał badawczy ( ziarniaki zbóż ) przygotowano analogicznie jak w punkcie 6.2.2.

##### **III. Przygotowanie próbki.**

- Po wyjęciu materiału z komory klimatyzacyjnej odważono żadaną ilość próbki.

##### **IV. Przeprowadzenie pomiarów**

- Zmierzono pojemność  $C_0$  pustego kondensatora pomiarowego.
- Umieszczono badany materiał w kondensatorze pomiarowym.
- Ustawiono określone napięcie probiercze zasilające okładki kondensatora płaskiego w celu wytworzenia żadanego natężenia pola elektrycznego.
- Rozładowano kondensator zamykając wyłącznik W (Rys. 53).



- Dokonano pomiaru pojemności kondensatora wypełnionego badanym materiałem (wstrząśnięto kondensator przed odczytem pojemności w celu zlikwidowania ewentualnej orientacji ziarniaków wywołanej polem elektrostatycznym).

V. Obliczono wartość przenikalności elektrycznej mieszaniny badanego materiału roślinnego i powietrza korzystając z zależności (7).

**T a b e l a 22.** Wzór tabeli wyników pomiaru przenikalności ziarniaków zbóż w funkcji natężenia pola elektrostatycznego  $w\% = \dots$ ,  $T = \dots$  K

**T a b e l e 22.** Table pattern for dielectric constant measurements vs. electrostatic field intensity  $w\% = \dots$ ,  $T = \dots$  K

Lp.	1		Seria ....	5	
	$E(kV\ m^{-1})$ $\times 100$	$\epsilon$		$E(kV\ m^{-1})$ $\times 100$	$\epsilon$
1	0		....	0	
2	0,1		....	0,1	
3	0,2		....	0,2	
....	....	....	....	....	....
16	4		....	4	
17	5		....	5	

VI. Wyniki pomiarów zestawiono w Tabeli 22, wzór której przedstawiono poniżej.

VII. Przenikalności elektryczne mieszaniny, w celu uzyskania przenikalności nasion, przeliczono korzystając z zależności (8) [102].

#### 6.4.3. Wyniki pomiarów przenikalności elektrycznej nasion zbóż w funkcji natężenia pola elektrostatycznego

W niniejszym rozdziale przedstawiono tabele wykresy zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków: jęczmienia, pszenicy i żyta w funkcji natężenia pola elektrostatycznego. Wyniki w formie tabelaryzowanej dotyczą dwóch skrajnych wilgotności ziarniaków, odpowiednio  $w = 11,5\%$  i  $w = 18,2\%$ .

### 6.4.3.1. Wyniki pomiarów przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia w funkcji natężenia pola elektrostatycznego

**T a b e l a 23.** Wyniki pomiaru przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia w funkcji natężenia pola elektrostatycznego:  $w\% = 11,5\%$ ,  $T = 293\text{ K}$

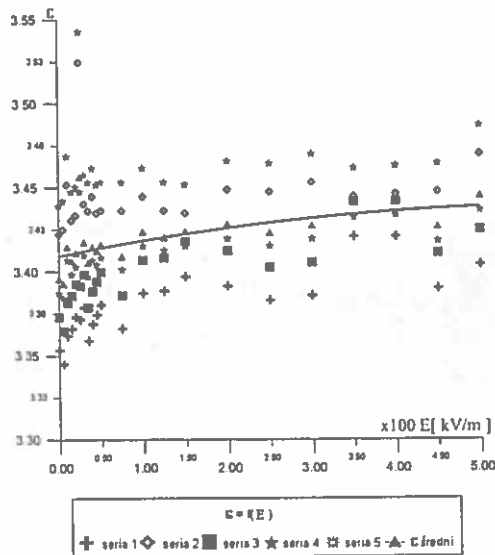
**T a b l e 23.** Test results of dielectric constant vs. electrostatic field intensity for barley at  $w\% = 11.5\%$ ,  $T = 293\text{ K}$

Lp.	E(kV m <sup>-1</sup> )	Seria					$\epsilon_{m\text{średni}}$
		1	2	3	4	5	
1	0	3,35	3,42	3,37	3,44	3,39	3,39
2	5	3,35	3,42	3,36	3,44	3,38	3,39
3	10	3,36	3,45	3,38	3,47	3,41	3,41
4	15	3,37	3,43	3,39	3,45	3,40	3,41
5	20	3,37	3,43	3,39	3,45	3,40	3,41
6	25	3,37	3,52	3,39	3,54	3,45	3,46
7	30	3,38	3,44	3,40	3,46	3,41	3,42
8	35	3,36	3,44	3,38	3,45	3,40	3,40
9	40	3,37	3,44	3,39	3,46	3,41	3,41
10	45	3,37	3,43	3,39	3,45	3,40	3,41
11	50	3,38	3,44	3,40	3,45	3,41	3,42
12	75	3,37	3,44	3,39	3,45	3,40	3,41
13	100	3,39	3,44	3,41	3,46	3,42	3,42
14	125	3,39	3,44	3,41	3,45	3,41	3,42
15	150	3,40	3,43	3,42	3,45	3,42	3,42
16	200	3,39	3,45	3,41	3,47	3,42	3,43
17	250	3,38	3,45	3,40	3,46	3,42	3,42
18	300	3,39	3,45	3,41	3,47	3,42	3,43
19	350	3,42	3,44	3,44	3,46	3,43	3,44
20	400	3,42	3,45	3,44	3,46	3,43	3,44
21	450	3,39	3,45	3,41	3,46	3,42	3,43
22	500	3,40	3,47	3,42	3,49	3,44	3,44

T a b e l a 24. Wyniki pomiaru przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia w funkcji natężenia pola elektrostatycznego:  $w_{\%} = 18.2\%$ ,  $T = 293\text{ K}$

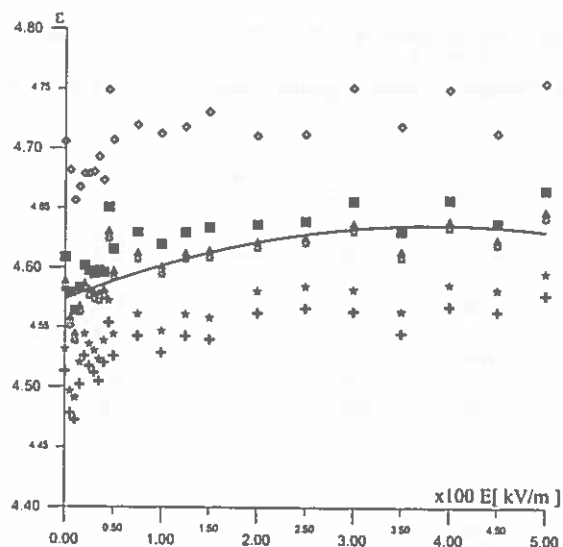
T a b l e 24. Test results of dielectric constant vs. electrostatic field intensity for barley at  $w_{\%} = 18.2\%$ ,  $T = 293\text{ K}$

Lp.	E(kV m <sup>-1</sup> )	Seria					$\epsilon_{m\text{średni}}$
		1	2	3	4	5	
1	0	8,97	9,27	9,02	9,32	9,12	9,14
2	5	9,00	9,33	9,04	9,37	9,16	9,18
3	10	9,05	9,36	9,10	9,41	9,21	9,23
4	15	9,10	9,38	9,14	9,42	9,24	9,26
5	20	9,14	9,40	9,18	9,45	9,27	9,29
6	25	9,15	9,38	9,19	9,43	9,26	9,28
7	30	9,15	9,43	9,20	9,48	9,29	9,31
8	35	9,16	9,47	9,20	9,51	9,31	9,33
9	40	9,20	9,45	9,25	9,50	9,33	9,35
10	45	9,21	9,46	9,26	9,51	9,34	9,36
11	50	9,23	9,48	9,28	9,52	9,35	9,37
12	75	9,24	9,52	9,28	9,56	9,38	9,40
13	100	9,27	9,50	9,31	9,54	9,38	9,40
14	125	9,30	9,56	9,34	9,61	9,43	9,45
15	150	9,32	9,52	9,36	9,57	9,42	9,44
16	200	9,32	9,47	9,37	9,52	9,40	9,42
17	250	9,43	9,42	9,48	9,46	9,42	9,44
18	300	9,52	9,42	9,57	9,47	9,47	9,49

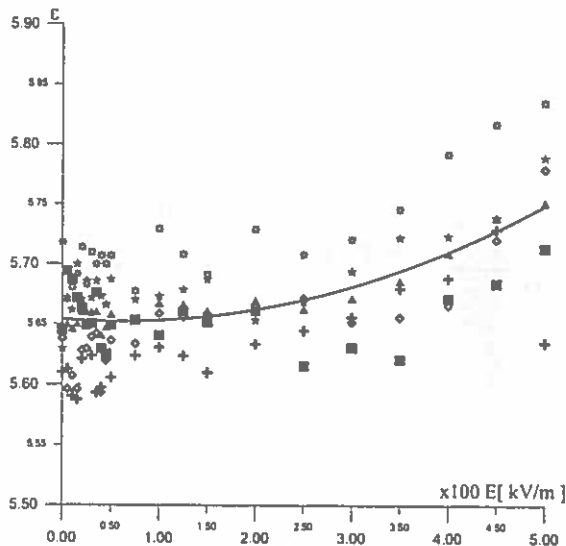


Rys. 54. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia w funkcji natężenia pola elektrostatycznego:  $w_{\%} = 11,5\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .

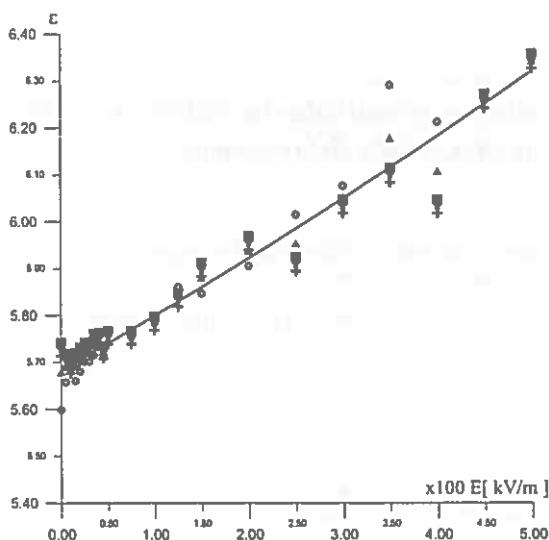
Fig. 54. The dependence of dielectric constant of barley vs. electrostatic field intensity:  $w_{\%} = 11.5\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ .



Rys. 55. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziemiaków jęczmienia w funkcji natężenia pola elektrostatycznego:  $w_s = 13,4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Objasnienia jak na Rys. 54.  
 Fig. 55. The dependence of dielectric constant of barley vs. electrostatic field intensity  $w_s = 13,4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Explanation as on Fig. 54.

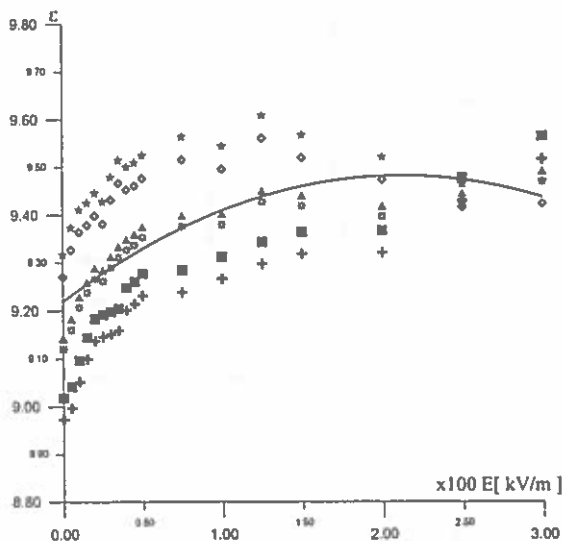


Rys. 56. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziemiaków jęczmienia w funkcji natężenia pola elektrostatycznego:  $w_s = 16,4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Objasnienia jak na Rys. 54.  
 Fig. 56. The dependence of dielectric constant of barley vs. electrostatic field intensity  $w_s = 16,4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Explanation as on Fig. 54.



Rys. 57. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia w funkcji natężenia pola elektrostatycznego:  $w\% = 17,2\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Objaśnienia jak na Rys. 54.

Fig. 57. The dependence of dielectric constant of barley vs. electrostatic field intensity:  $w\% = 17.2\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Explanation as on Fig. 54.



Rys. 58. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia w funkcji natężenia pola elektrostatycznego:  $w\% = 18,2\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Objaśnienia jak na Rys. 54.

Fig. 58. The dependence of dielectric constant of barley vs. electrostatic field intensity:  $w\% = 18.2\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Explanation as on Fig. 54.

### 6.4.3.2. Wyniki pomiarów przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy w funkcji natężenia pola elektrycznego

**T a b e l a 25.** Wyniki pomiaru przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy w funkcji natężenia pola elektrostatycznego: w% = 10.9%, T = 293 K

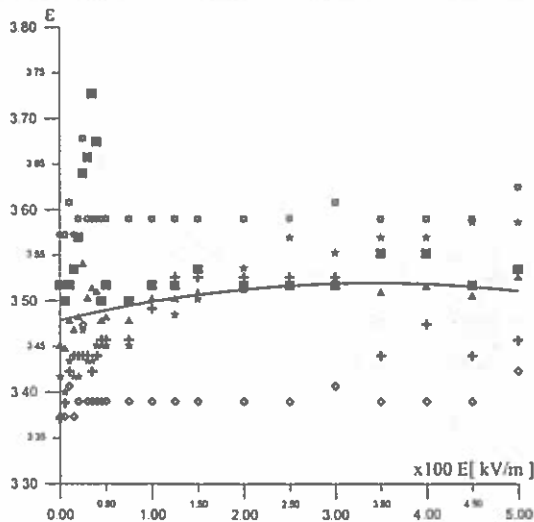
**T a b l e 25.** Test results of dielectric constant vs. electrostatic field intensity for wheat at w% = 10.9%, T = 293 K

Lp.	E(kV m <sup>-1</sup> )	Seria					$\epsilon_{m\text{średni}}$
		1	2	3	4	5	
1	0	3,37	3,37	3,52	3,42	3,57	3,45
2	5	3,39	3,37	3,50	3,40	3,57	3,45
3	10	3,42	3,41	3,52	3,43	3,61	3,48
4	15	3,44	3,37	3,54	3,42	3,57	3,47
5	20	3,44	3,39	3,57	3,42	3,59	3,48
6	25	3,44	3,47	3,64	3,47	3,68	3,54
7	30	3,44	3,39	3,66	3,43	3,59	3,50
8	35	3,42	3,39	3,73	3,43	3,59	3,51
9	40	3,44	3,39	3,68	3,45	3,59	3,51
10	45	3,46	3,39	3,50	3,45	3,59	3,48
11	50	3,46	3,39	3,52	3,45	3,59	3,48
12	75	3,46	3,39	3,50	3,45	3,59	3,48
13	100	3,49	3,39	3,52	3,52	3,59	3,50
14	125	3,53	3,39	3,52	3,49	3,59	3,50
15	150	3,53	3,39	3,54	3,50	3,59	3,51
16	200	3,53	3,39	3,52	3,54	3,59	3,51
17	250	3,53	3,39	3,52	3,57	3,59	3,52
18	300	3,53	3,41	3,52	3,55	3,61	3,52
19	350	3,44	3,39	3,55	3,57	3,59	3,51
20	400	3,47	3,39	3,55	3,57	3,59	3,52
21	450	3,44	3,39	3,52	3,59	3,59	3,51
22	500	3,46	3,42	3,54	3,59	3,63	3,53

**T a b e l a 26.** Wyniki pomiaru przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy w funkcji natężenia pola elektrostatycznego:  $w_{\%}=21\%$ ,  $T = 293\text{ K}$

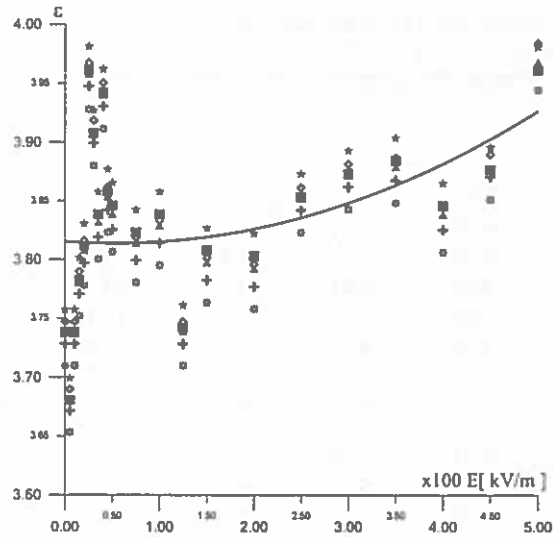
**T a b l e 26.** Test results of dielectric constant vs. electrostatic field intensity for wheat at  $w_{\%}=21\%$ ,  $T = 293\text{ K}$

Lp.	E(kV m <sup>-1</sup> )	Seria					$\epsilon_{m\text{średni}}$
		1	2	3	4	5	
1	0	4,58	4,79	4,72	4,75	4,71	4,71
2	5	4,59	4,76	4,79	4,90	4,73	4,75
3	10	4,62	4,84	4,76	4,80	4,93	4,79
4	15	4,64	4,85	4,84	4,93	5,01	4,85
5	20	4,66	4,80	4,86	5,06	4,90	4,86
6	25	4,61	4,67	4,75	4,99	4,96	4,80
7	30	4,50	4,87	4,87	5,02	4,97	4,85
8	35	4,39	4,95	4,87	5,10	5,10	4,88
9	40	4,41	5,06	4,95	5,21	5,17	4,96
10	45	4,88	5,36	5,13	5,27	5,12	5,15
11	50	4,42	5,25	4,97	5,28	5,07	5,00
12	75	4,42	5,28	4,91	5,30	5,14	5,01
13	100	4,73	5,03	5,22	5,35	5,08	5,08
14	125	4,80	5,06	5,18	5,39	5,23	5,13
15	150	4,87	4,98	5,01	5,30	5,34	5,10
16	200	4,82	5,07	5,19	5,28	5,33	5,14
17	250	4,93	5,34	5,31	5,25	5,22	5,21
18	300	5,10	5,34	5,36	5,37	5,31	5,30



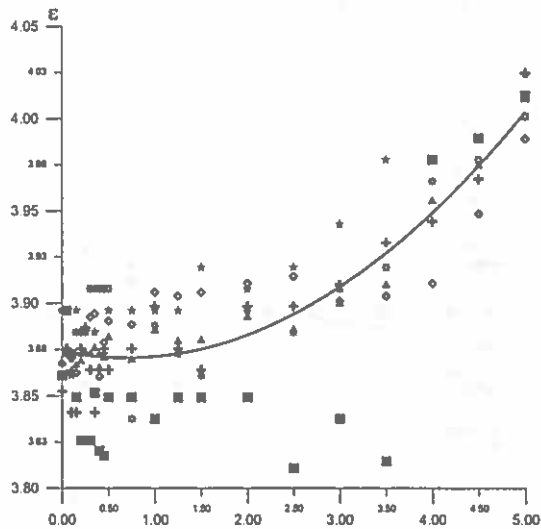
**Rys. 59.** Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy w funkcji natężenia pola elektrostatycznego:  $w_{\%}=10,9\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Objasnienia jak na Rys. 54.

**Fig. 59.** The dependence of dielectric constant of wheat vs. electrostatic field intensity:  $w_{\%}=10,9\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Explanation as on Fig. 54.



Rys. 60. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy w funkcji natężenia pola elektrostatycznego:  $w_{\%} = 13,4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Objaśnienia jak na Rys. 54.

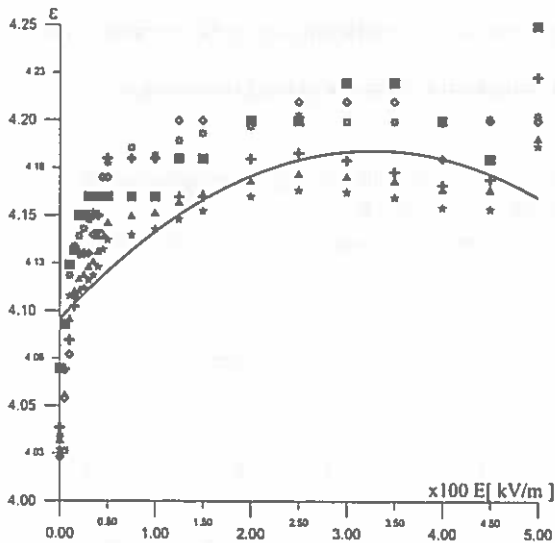
Fig. 60. The dependence of dielectric constant of wheat vs. electrostatic field intensity:  $w_{\%} = 13,4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Explanation as on Fig. 54.



Rys. 61. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy w funkcji natężenia pola elektrostatycznego:  $w_{\%} = 16,4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Objaśnienia jak na Rys. 54.

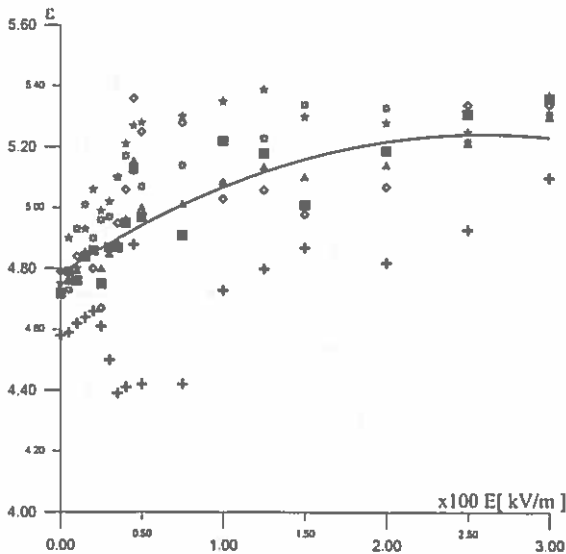
Fig. 61. The dependence of dielectric constant of wheat vs. electrostatic field intensity:  $w_{\%} = 16,4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Explanation as on Fig. 54.





Rys. 62. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy w funkcji natężenia pola elektrostatycznego:  $w_w = 17,4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Objasnienia jak na Rys. 54.

Fig. 62. The dependence of dielectric constant of wheat vs. electrostatic field intensity:  $w_w = 17,4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Explanation as on Fig. 54.



Rys. 63. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy w funkcji natężenia pola elektrostatycznego:  $w_w = 21\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Objasnienia jak na Rys. 54.

Fig. 63. The dependence of dielectric constant of wheat vs. electrostatic field intensity:  $w_w = 21\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Explanation as on Fig. 54.

### 6.4.3.3. Wyniki pomiarów przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta w funkcji natężenia pola elektrostatycznego

T a b e l a 27. Wyniki pomiaru przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta w funkcji natężenia pola elektrostatycznego: w% =9,7 %, T = 293 K

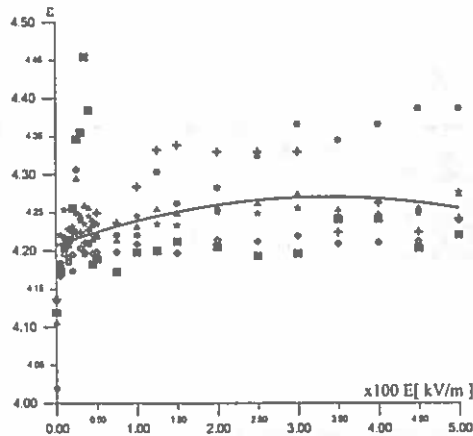
T a b l e 27. Test results of dielectric constant vs. electrostatic field intensity for rye at w% =9.7 %, T = 293 K

Lp.	E(kV m <sup>-1</sup> )	Seria					$\epsilon_{m\text{średni}}$
		1	2	3	4	5	
1	0	4,14	4,13	4,12	4,12	4,02	4,11
2	5	4,17	4,18	4,18	4,22	4,17	4,18
3	10	4,21	4,22	4,20	4,25	4,20	4,22
4	15	4,22	4,19	4,21	4,23	4,19	4,21
5	20	4,22	4,20	4,26	4,23	4,17	4,22
6	25	4,22	4,31	4,35	4,34	4,25	4,29
7	30	4,22	4,20	4,36	4,24	4,20	4,25
8	35	4,21	4,20	4,45	4,23	4,20	4,26
9	40	4,23	4,21	4,38	4,25	4,21	4,26
10	45	4,24	4,20	4,18	4,23	4,22	4,21
11	50	4,25	4,20	4,19	4,23	4,22	4,22
12	75	4,24	4,20	4,17	4,23	4,22	4,21
13	100	4,28	4,21	4,20	4,25	4,22	4,23
14	125	4,33	4,20	4,20	4,23	4,30	4,25
15	150	4,34	4,20	4,21	4,23	4,26	4,25
16	200	4,33	4,21	4,20	4,25	4,28	4,26
17	250	4,33	4,21	4,19	4,25	4,32	4,26
18	300	4,33	4,22	4,20	4,26	4,37	4,27
19	350	4,22	4,21	4,24	4,25	4,35	4,25
20	400	4,26	4,21	4,24	4,25	4,37	4,27
21	450	4,22	4,21	4,20	4,25	4,39	4,25
22	500	4,24	4,24	4,22	4,28	4,39	4,27

**T a b e l a 28.** Wyniki pomiaru przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta w funkcji natężenia pola elektrostatycznego:  $w\% = 21\%$ ,  $T = 293\text{ K}$

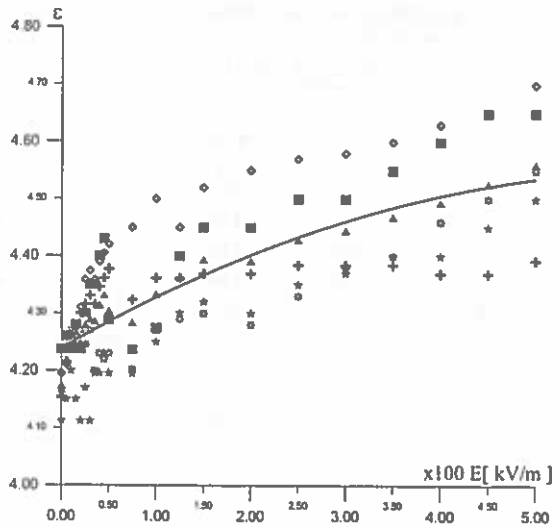
**T a b e l e 28.** Test results of dielectric constant vs. electrostatic field intensity for rye at  $w\% = 21\%$ ,  $T = 293\text{ K}$

Lp.	E(kV m <sup>-1</sup> )	Seria					$\epsilon_{m\text{średni}}$
		1	2	3	4	5	
1	0	4,80	4,61	4,92	4,70	4,81	4,77
2	5	4,87	4,63	4,89	4,75	4,90	4,81
3	10	4,92	4,66	4,94	4,80	4,93	4,85
4	15	4,94	4,69	4,89	4,75	4,90	4,83
5	20	4,97	4,74	4,97	4,70	4,93	4,86
6	25	4,98	4,79	5,02	4,77	4,90	4,90
7	30	5,00	4,81	5,02	4,70	4,93	4,89
8	35	4,98	4,79	5,08	4,80	4,85	4,90
9	40	5,02	4,83	5,12	4,80	4,89	4,93
10	45	5,04	4,85	4,95	4,84	4,87	4,91
11	50	5,06	4,86	4,89	4,80	4,89	4,90
12	75	4,99	4,90	4,94	4,80	4,85	4,90
13	100	5,04	4,95	5,08	4,86	4,93	4,97
14	125	5,04	4,90	5,14	4,92	4,95	4,99
15	150	5,05	4,97	5,14	4,94	4,97	5,01
16	200	5,05	5,01	5,20	4,92	4,94	5,02
17	250	5,06	5,03	5,20	4,98	5,00	5,05
18	300	5,06	5,04	5,26	5,00	5,06	5,08
19	350	5,06	5,06	5,31	5,03	5,08	5,11
20	400	5,05	5,09	5,37	5,03	5,15	5,14
21	450	5,05	5,12	5,37	5,09	5,20	5,16
22	500	5,07	5,17	5,37	5,15	5,26	5,16



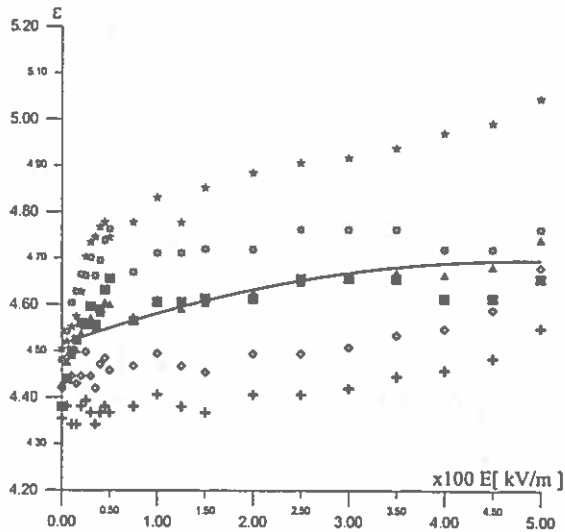
**Rys. 64.** Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta w funkcji natężenia pola elektrostatycznego:  $w\% = 9,7\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Objasnienia jak na Rys. 54.

**Fig. 64.** The dependence of dielectric constant of rye vs. electrostatic field intensity:  $w\% = 9.7\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Explanation as on Fig. 54.



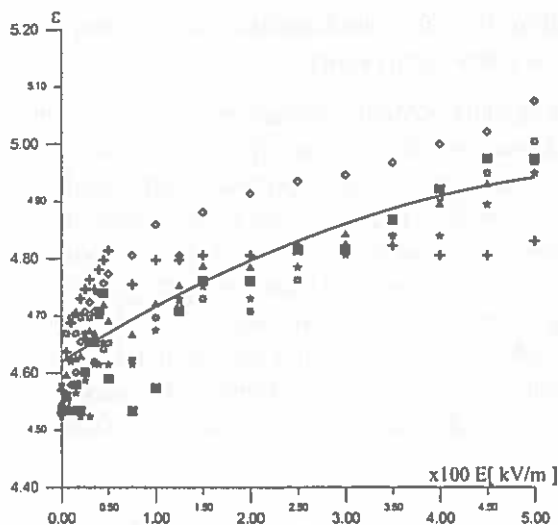
Rys. 65. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta w funkcji natężenia pola elektrostatycznego:  $w_{\%} = 13,4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Objaśnienia jak na Rys. 54.

Fig. 65. The dependence of dielectric constant of rye vs. electrostatic field intensity:  $w_{\%} = 13,4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Explanation as on Fig. 54.



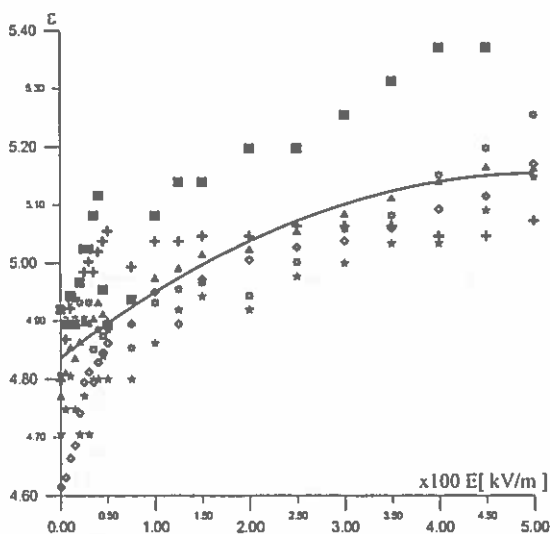
Rys. 66. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta w funkcji natężenia pola elektrostatycznego:  $w_{\%} = 16,4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Objaśnienia jak na Rys. 54.

Fig. 66. The dependence of dielectric constant of rye vs. electrostatic field intensity:  $w_{\%} = 16,4\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Explanation as on Fig. 54.



Rys. 67. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta w funkcji natężenia pola elektrostatycznego:  $w_{\%} = 18,6\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Objaśnienia jak na Rys. 54.

Fig. 67. The dependence of dielectric constant of rye vs. electrostatic field intensity:  $w_{\%} = 18,6\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Explanation as on Fig. 54.



Rys. 68. Wykres zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta w funkcji natężenia pola elektrostatycznego:  $w_{\%} = 21\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Objaśnienia jak na Rys. 54.

Fig. 68. The dependence of dielectric constant of rye vs. electrostatic field intensity:  $w_{\%} = 21\%$ ,  $T = 293\text{ K}$ . Explanation as on Fig. 54.

#### 6.4.4. Analiza wyników badań przenikalności elektrycznej ziarniaków w funkcji natężenia pola elektrostatycznego

W niniejszym rozdziale zostały przedstawione wyniki zmiany przenikalności elektrycznej ziarniaków: jęczmienia, pszenicy i żyta w funkcji natężenia pola elektrostatycznego. Policzone zostały ponadto odpowiadające im odchylenia standardowe  $\sigma$ , średnie błędy  $\Delta \epsilon_{m \text{ średni}}$  wartości średniej (wzór (10), (13)) oraz współczynniki korelacji określające związek między wpływem pola elektrostatycznego na przenikalność ziarniaków jednego gatunku w powiązaniu z wpływem na inny gatunek, (np. jęczmień - pszenica), jakie mogą wystąpić między poszczególnymi gatunkami nasion ( w tym przypadku: jęczmień, pszenica, żyto ). W Tabelach 29÷34 zostały podane zmiany przenikalności elektrycznej  $\Delta \epsilon$  ziarniaków oraz odpowiadające im odchylenia standardowe  $\sigma$  i średnie błędy  $\Delta \epsilon_{m \text{ średni}}$  wartości średniej.

**T a b e l a 29.** Zmiana przenikalności elektrycznej  $\Delta \epsilon$  oraz odchylenie standardowe  $\sigma$  w funkcji natężenia pola elektrostatycznego dla ziarniaków jęczmienia o wilgotności  $w_{\%} = 11,5 \%$

**T a b l e 29.** Dielectric constant change  $\Delta \epsilon$  and standard deviation  $\sigma$  vs. electrostatic field intensity for barley at moisture content  $w_{\%} = 11.5 \%$

$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\epsilon_{\text{średni}}$	$\sigma$	$\Delta \epsilon_{m \text{ średni}}$	$\Delta \epsilon$ (%)
0	3,39	0,029	0,021	0,0
0,05	3,39	0,032	0,023	0,0
0,1	3,41	0,037	0,027	0,6
0,15	3,41	0,026	0,019	0,6
0,2	3,41	0,026	0,019	0,6
0,25	3,46	0,061	0,045	2,1
0,3	3,42	0,026	0,019	0,9
0,35	3,40	0,031	0,023	0,3
0,4	3,41	0,029	0,021	0,6
0,45	3,41	0,026	0,019	0,6
0,5	3,42	0,023	0,017	0,9
0,75	3,41	0,028	0,020	0,6
1	3,42	0,021	0,015	0,9
1,25	3,42	0,020	0,015	0,9
1,5	3,42	0,013	0,009	0,9
2	3,43	0,026	0,019	1,2
2,5	3,42	0,026	0,019	0,9
3	3,43	0,026	0,019	1,2
3,5	3,44	0,010	0,007	1,5
4	3,44	0,012	0,009	1,5
4,5	3,43	0,023	0,017	1,2
5	3,44	0,029	0,021	1,5

**T a b e l a 30.** Zmiana przenikalności elektrycznej  $\Delta\epsilon$  oraz odchylenie standardowe  $\sigma$  w funkcji natężenia pola elektrostatycznego dla ziarniaków jęczmienia o wilgotności  $w_{\%} = 18,2\%$

**T a b l e 30.** Dielectric constant change  $\Delta\epsilon$  and standard deviation  $\sigma$  vs. electrostatic field intensity for barley at moisture content  $w_{\%} = 18.2\%$

$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\epsilon_{\text{średni}}$	$\sigma$	$\Delta\epsilon_m \text{ średni}$	$\Delta\epsilon$ (%)
0	9,14	0,124	0,091	0,0
0,05	9,18	0,136	0,099	0,4
0,1	9,23	0,127	0,093	1,0
0,15	9,26	0,115	0,084	1,3
0,2	9,29	0,110	0,080	1,6
0,25	9,28	0,098	0,072	1,5
0,3	9,31	0,116	0,085	1,9
0,35	9,33	0,128	0,093	2,1
0,4	9,35	0,103	0,075	2,3
0,45	9,36	0,103	0,075	2,4
0,5	9,37	0,102	0,074	2,5
0,75	9,4	0,115	0,084	2,8
1	9,4	0,096	0,070	2,8
1,25	9,45	0,110	0,080	3,4
1,5	9,44	0,086	0,063	3,3
2	9,42	0,063	0,046	3,1
2,5	9,44	0,022	0,016	3,3
3	9,49	0,044	0,032	3,8

**T a b e l a 31.** Zmiana przenikalności elektrycznej  $\Delta\epsilon$  oraz odchylenie standardowe  $\sigma$  w funkcji natężenia pola elektrostatycznego dla ziarniaków pszenicy o wilgotności  $w_{\%} = 10,9\%$

**T a b l e 31.** Dielectric constant change  $\Delta\epsilon$  and standard deviation  $\sigma$  vs. electrostatic field intensity for wheat at moisture content  $w_{\%} = 10.9\%$

$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\epsilon_{\text{średni}}$	$\sigma$	$\Delta\epsilon_m \text{ średni}$	$\Delta\epsilon$ (%)
0	3,45	0,076	0,056	0,0
0,05	3,45	0,071	0,052	0,0
0,1	3,48	0,070	0,051	0,9
0,15	3,47	0,070	0,051	0,6
0,2	3,48	0,078	0,057	0,9
0,25	3,54	0,096	0,070	2,6
0,3	3,50	0,098	0,072	1,4
0,35	3,51	0,118	0,086	1,7
0,4	3,51	0,100	0,073	1,7
0,45	3,48	0,054	0,039	0,9
0,5	3,48	0,058	0,042	0,9
0,75	3,48	0,054	0,039	0,9
1	3,50	0,050	0,037	1,4

Tabela 31. Kontynuacja  
Table 31. Continuation

$E(kV m^{-1})$ $\times 100$	$\epsilon_{\text{średni}}$	$\sigma$	$\Delta\epsilon_m \text{ średni}$	$\Delta\epsilon$ (%)
1,25	3,50	0,051	0,037	1,4
1,5	3,51	0,052	0,038	1,7
2	3,51	0,050	0,037	1,7
2,5	3,52	0,052	0,038	2,0
3	3,52	0,047	0,034	2,0
3,5	3,51	0,074	0,054	1,7
4	3,52	0,067	0,049	2,0
4,5	3,51	0,073	0,053	1,7
5	3,53	0,070	0,051	2,3

Tabela 32. Zmiana przenikalności elektrycznej  $\Delta\epsilon$  oraz odchylenie standardowe  $\sigma$  w funkcji natężenia pola elektrostatycznego dla ziarniaków pszenicy o wilgotności  $w_{\%} = 21\%$

Table 32. Dielectric constant change  $\Delta\epsilon$  and standard deviation  $\sigma$  vs. electrostatic field intensity for wheat at moisture content  $w_{\%} = 21\%$

$E(kV m^{-1})$ $\times 100$	$\epsilon_{\text{średni}}$	$\sigma$	$\Delta\epsilon_m \text{ średni}$	$\Delta\epsilon$ (%)
0	4,71	0,052	0,038	0,0
0,05	4,75	0,075	0,055	0,8
0,1	4,79	0,080	0,058	1,7
0,15	4,85	0,093	0,068	3,0
0,2	4,86	0,101	0,074	3,2
0,25	4,8	0,143	0,104	1,9
0,3	4,85	0,138	0,101	3,0
0,35	4,88	0,202	0,148	3,6
0,4	4,96	0,224	0,164	5,3
0,45	5,15	0,130	0,095	9,3
0,5	5,00	0,242	0,177	6,2
0,75	5,01	0,276	0,202	6,4
1	5,08	0,162	0,118	7,9
1,25	5,13	0,162	0,118	8,9
1,5	5,10	0,176	0,129	8,3
2	5,14	0,154	0,112	9,1
2,5	5,21	0,112	0,082	10,6
3	5,30	0,078	0,057	12,5



**T a b e l a 33.** Zmiana przenikalności elektrycznej  $\Delta\epsilon$  oraz odchylenie standardowe  $\sigma$  w funkcji natężenia pola elektrostatycznego dla ziarniaków żyta o wilgotności  $w_s = 9,7\%$

**T a b l e 33.** Dielectric constant change  $\Delta\epsilon$  and standard deviation  $\sigma$  vs. electrostatic field intensity for rye at moisture content  $w_s = 9.7\%$

$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\epsilon_{\text{średni}}$	$\sigma$	$\Delta\epsilon_m \text{ średni}$	$\Delta\epsilon$ (%)
0	4,11	0,034	0,025	0,0
0,05	4,18	0,014	0,010	1,7
0,1	4,22	0,015	0,011	2,7
0,15	4,21	0,014	0,010	2,4
0,2	4,22	0,025	0,018	2,7
0,25	4,29	0,047	0,034	4,4
0,3	4,25	0,046	0,034	3,4
0,35	4,26	0,077	0,056	3,6
0,4	4,26	0,050	0,037	3,6
0,45	4,21	0,019	0,014	2,4
0,5	4,22	0,018	0,013	2,7
0,75	4,21	0,022	0,016	2,4
1	4,23	0,026	0,019	2,9
1,25	4,25	0,050	0,037	3,4
1,5	4,25	0,042	0,031	3,4
2	4,26	0,041	0,030	3,6
2,5	4,26	0,052	0,038	3,6
3	4,27	0,059	0,043	3,9
3,5	4,25	0,038	0,028	3,4
4	4,27	0,042	0,031	3,9
4,5	4,25	0,054	0,039	3,4
5	4,27	0,049	0,036	3,9

**T a b e l a 34.** Zmiana przenikalności elektrycznej  $\Delta\epsilon$  oraz odchylenie standardowe  $\sigma$  w funkcji natężenia pola elektrostatycznego dla ziarniaków żyta o wilgotności  $w_s = 21\%$

**T a b l e 34.** Dielectric constant change  $\Delta\epsilon$  and standard deviation  $\sigma$  vs. electrostatic field intensity for rye at moisture content  $w_s = 21\%$

$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\epsilon_{\text{średni}}$	$\sigma$	$\Delta\epsilon_m \text{ średni}$	$\Delta\epsilon$ (%)
0	4,77	0,090	0,066	0,0
0,05	4,81	0,094	0,069	0,8
0,1	4,85	0,096	0,070	1,7
0,15	4,83	0,091	0,066	1,3
0,2	4,86	0,114	0,083	1,9
0,25	4,90	0,090	0,066	2,7

Tabela 34. Kontynuacja  
Table 34. Continuation

$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\varepsilon_{\text{średni}}$	$\sigma$	$\Delta\varepsilon_{\text{m średni}}$	$\Delta\varepsilon$ (%)
0,3	4,89	0,110	0,080	2,5
0,35	4,90	0,104	0,076	2,7
0,4	4,93	0,110	0,080	3,4
0,45	4,91	0,068	0,050	2,9
0,5	4,90	0,064	0,047	2,7
0,75	4,90	0,057	0,042	2,7
1	4,97	0,070	0,051	4,2
1,25	4,99	0,080	0,058	4,6
1,5	5,01	0,065	0,047	5,0
2	5,02	0,081	0,059	5,2
2,5	5,05	0,061	0,045	5,9
3	5,08	0,070	0,051	6,5
3,5	5,11	0,081	0,059	7,1
4	5,14	0,098	0,072	7,8
4,5	5,16	0,095	0,069	8,2
5	5,16	0,089	0,065	8,2

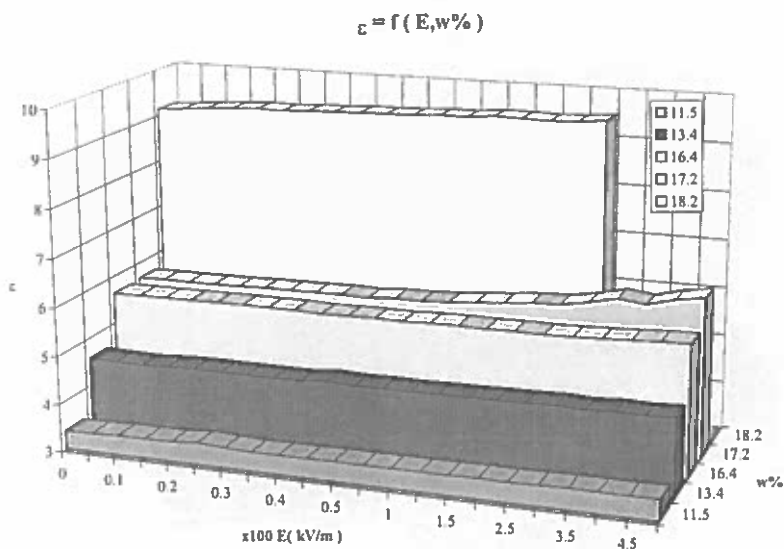
Na przykładzie jęczmienia o wilgotności  $w\% = 11,5\%$  (Tabela 23), dla  $E = 500 \text{ kV m}^{-1}$  i poziomu ufności) 80 % można podać, że wartość zmierzona jest równa:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{m średni}} \pm t \frac{\delta}{\sqrt{N}} = 3,44 \pm 0,021, \quad (41)$$

Jeżeli zwiększymy poziom ufności, np. do 95 %, to wynik pomiaru będzie:

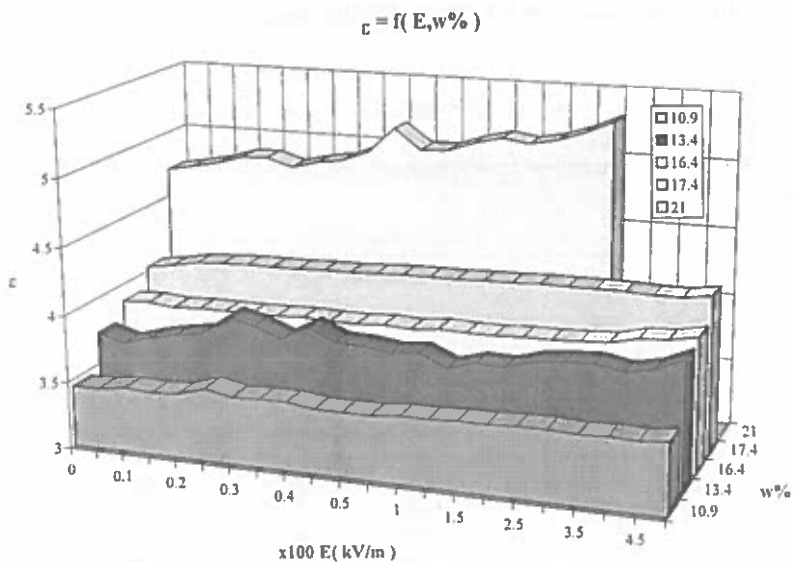
$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{m średni}} \pm t \frac{\delta}{\sqrt{N}} = 3,44 \pm 0,036, \quad (42)$$

Chcąc otrzymać większą pewność wyniku, należy zwiększyć dopuszczalne odchyłki od wartości średniej. Na Rys. 69÷71 przedstawiono zbiorcze histogramy zależności  $\varepsilon = f(E, w\%)$  dla ziarniaków: jęczmienia, pszenicy i żyta.



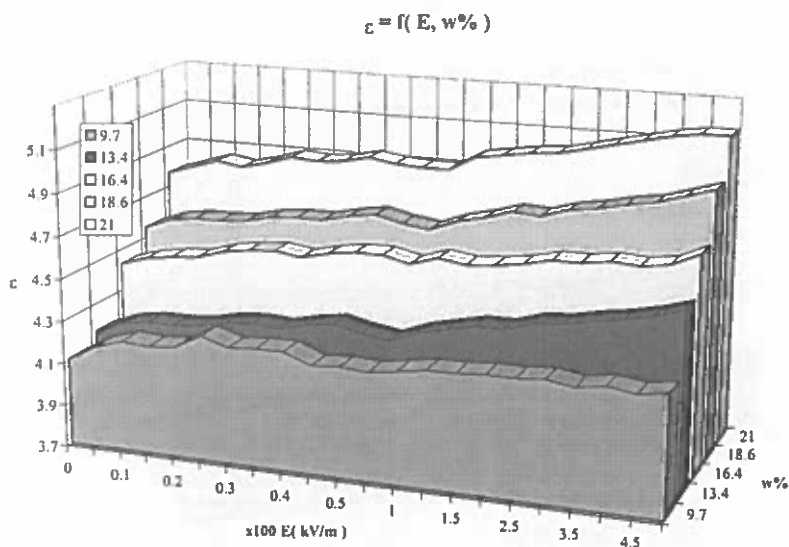
Rys. 69. Wykres zależności  $\varepsilon = f(E, w\%)$  dla ziarniaków jęczmienia.

Fig. 69. The dependence of  $\varepsilon = f(E, w\%)$  for barley.



Rys. 70. Wykres zależności  $\varepsilon = f(E, w\%)$  dla ziarniaków pszenicy.

Fig. 70. The dependence of  $\varepsilon = f(E, w\%)$  for wheat.



Rys. 71. Wykres zależności  $\varepsilon = f(E, w\%)$  dla ziarniaków żyta.

Fig. 71. The dependence of  $\varepsilon = f(E, w\%)$  for rye.

#### 6.4.5. Określanie korelacji pomiędzy gatunkami nasion i wpływem natężenia pola elektrostatycznego na ich przenikalność elektryczną

T a b e l a 35. Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziarniaków jęczmienia i pszenicy o wilgotności  $w\% = \text{var}$ , w funkcji natężenia pola elektrostatycznego

T a b l e 35. Correlation coefficients  $\rho$  vs. electrostatic field intensity for barley and wheat of varied moisture content

Lp.	E(kV m <sup>-1</sup> ) x100	$\rho$				
		w%				
		11,5	13,4	16,4	17,2	18,2
		(%)				
1	0	0,83	0,39	0,97	0,69	0,93
2	0,05	0,79	0,38	0,97	0,74	0,93
3	0,1	0,73	0,26	0,97	0,80	0,93
4	0,15	0,71	0,06	0,97	0,81	0,92
5	0,2	0,71	-0,05	0,97	0,81	0,92
6	0,25	0,68	-0,10	0,97	0,80	0,91
7	0,3	0,55	0,06	0,97	0,80	0,88
8	0,35	0,55	0,19	0,98	0,80	0,84

Tabela 35. Kontynuacja  
Table 35. Continuation

Lp.	E(kV m <sup>-1</sup> ) x100	$\rho$				
		w%				
		11,5	13,4	16,4	17,2	18,2
		(%)				
9	0,4	0,69	0,17	0,97	0,79	0,77
10	0,45	0,77	0,59	0,98	0,78	0,70
11	0,5	0,72	0,59	0,98	0,75	0,90
12	0,75	0,74	0,63	0,98	0,71	0,87
13	1	0,58	0,62	0,97	0,64	0,83
14	1,25	0,49	0,66	0,97	0,53	0,78
15	1,5	0,32	0,59	0,97	0,46	0,84
16	2	0,17	0,50	0,97	0,35	0,99
17	2,5	0,11	0,45	0,97	0,41	1,00
18	3	0,33	0,38	0,96	0,56	X
19	3,5	0,52	0,46	0,93	0,75	X
20	4	0,87	0,52	0,82	0,78	X
21	4,5	1,00	1,00	1,00	1,00	X
22	5	X	X	X	X	X

Tabela 36. Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziemiaków jęczmienia i żyta o wilgotności w% = var, w funkcji natężenia pola elektrostatycznego

Table 36. Correlation coefficients  $\rho$  vs. electrostatic field intensity for barley and rye of varied moisture content

Lp.	E(kV m <sup>-1</sup> ) x100	$\rho$				
		w%				
		11,5	13,4	16,4	17,2	18,2
		(%)				
1	0	0,92	0,80	0,75	0,96	0,93
2	0,05	0,98	0,83	0,77	0,97	0,92
3	0,1	0,97	0,81	0,79	0,97	0,91
4	0,15	0,96	0,82	0,81	0,97	0,91
5	0,2	0,96	0,79	0,82	0,97	0,89
6	0,25	0,96	0,78	0,84	0,98	0,86
7	0,3	0,94	0,76	0,85	0,98	0,89
8	0,35	0,95	0,74	0,85	0,98	0,88
9	0,4	0,95	0,70	0,88	0,98	0,87
10	0,45	0,96	0,67	0,87	0,97	0,89

Tabela 36. Kontynuacja  
Table 36. Continuation

Lp.	E(kV m <sup>-1</sup> ) x100	$\rho$				
		w%				
		11,5	13,4	16,4	17,2	18,2
		(%)				
11	0,5	0,95	0,76	0,6	0,98	0,87
12	0,75	0,93	0,72	0,86	0,97	0,80
13	1	0,85	0,74	0,84	0,98	0,77
14	1,25	0,83	0,65	0,83	0,97	0,63
15	1,5	0,83	0,59	0,85	0,97	0,85
16	2	0,81	0,48	0,83	0,96	0,97
17	2,5	0,86	0,42	0,82	0,95	1,00
18	3	0,87	0,31	0,80	0,94	X
19	3,5	0,90	0,70	0,75	0,89	X
20	4	0,87	0,40	0,85	0,99	X
21	4,5	1,00	1,00	1,00	1,00	X
22	5	X	X	X	X	X

Tabela 37. Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziarniaków pszenicy i żyta o wilgotności w% = var, w funkcji natężenia pola elektrostatycznego

Table 37. Correlation coefficients  $\rho$  vs. electrostatic field intensity for wheat and rye of varied moisture content

Lp.	E(kV m <sup>-1</sup> ) x100	$\rho$				
		w%				
		11,5	13,4	16,4	17,2	18,2
		(%)				
1	0	0,92	0,51	0,75	0,83	0,91
2	0,05	0,98	0,45	0,78	0,83	0,90
3	0,1	0,97	0,36	0,83	0,86	0,88
4	0,15	0,96	0,29	0,84	0,86	0,87
5	0,2	0,96	0,22	0,88	0,84	0,85
6	0,25	0,96	0,17	0,88	0,82	0,84
7	0,3	0,94	0,33	0,88	0,80	0,84
8	0,35	0,95	0,44	0,88	0,79	0,83
9	0,4	0,95	0,44	0,91	0,76	0,82
10	0,45	0,96	0,67	0,90	0,76	0,83

Tabela 37. Kontynuacja  
Table 37. Continuation

Lp.	E(kV m <sup>-1</sup> ) x100	$\rho$				
		w%				
		11,5	13,4	16,4	17,2	18,2
		(%)				
11	0,5	0,95	0,70	0,90	0,75	0,95
12	0,75	0,93	0,77	0,89	0,71	0,94
13	1	0,85	0,82	0,89	0,63	0,94
14	1,25	0,83	0,91	0,88	0,49	0,93
15	1,5	0,83	0,88	0,88	0,41	1,00
16	2	0,81	0,85	0,87	0,31	1,00
17	2,5	0,86	0,76	0,85	0,39	1,00
18	3	0,87	0,73	0,83	0,48	X
19	3,5	0,90	0,82	0,77	0,64	X
20	4	0,87	0,99	1,00	0,87	X
21	4,5	1,00	1,00	1,00	1,00	X

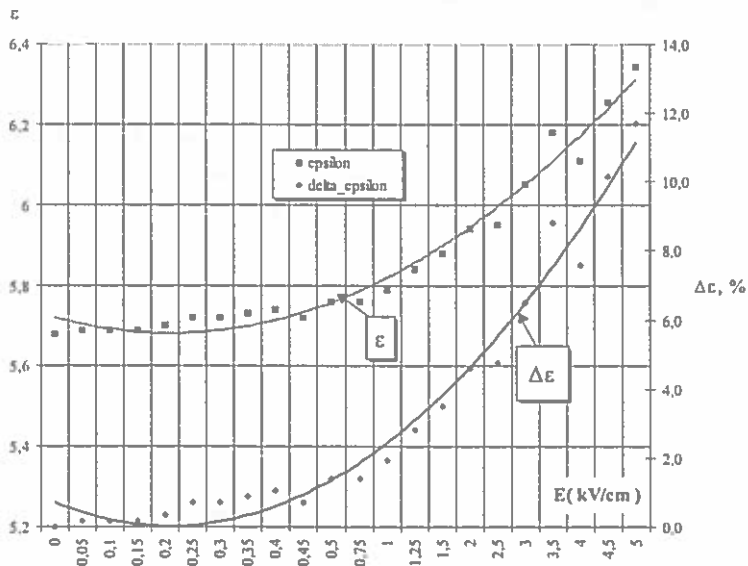
#### 6.4.6. Wnioski z badań przenikalności elektrycznej ziarniaków w funkcji natężenia pola elektrostatycznego

Na podstawie wyników badań przenikalności elektrycznej ziarniaków poddanych działaniu pola elektrostatycznego można stwierdzić, że:

1. Wartość przenikalności elektrycznej ziarniaka zależy od natężenia pola elektrostatycznego (Tabela 23÷28, Rys. 54÷68).
2. Wielkość zmiany przenikalności elektrycznej ziarniaków zależy od ich wilgotności.
3. Przy wzroście natężenia pola elektrostatycznego przenikalność elektryczna ziarniaków rośnie (silniej dla ziarniaków o wyższej wilgotności).
4. Przy wzroście natężenia pola elektrostatycznego w granicach 0÷500 kV m<sup>-1</sup> otrzymano wzrost średniej przenikalności elektrycznej: dla jęczmienia o wilgotności w% = 17,2 %, maksymalne  $\Delta\epsilon = 11,7$  % (Rys. 72).
5. Dla pszenicy uzyskano największy wzrost przenikalności  $\Delta\epsilon = 12,5$  % (Rys. 73) przy wilgotności w% = 21 %.
6. Dla żyta uzyskano maksymalny wzrost przenikalności elektrycznej  $\Delta\epsilon = 9,4$  % przy wilgotności w% = 13,4 % (Rys. 74).
7. Stwierdzono znaczący wpływ wilgotności ziarniaków na zmianę badanej przenikalności elektrycznej. Krzywe dla wyższych wartości natężenia pola

znajdują się nad krzywymi odpowiadającymi niższemu natężeniu. Na wykresach (Rys. 72÷74) zostały przedstawione linie trendu. Charakteryzują się one wysoką wiarygodnością ( $R$  - kwadrat bliski 1).

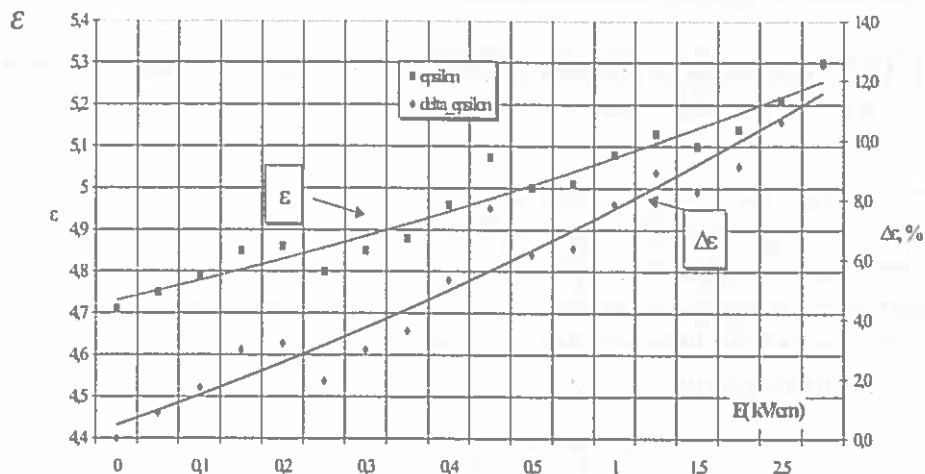
8. Na podstawie wyników obliczeń współczynników korelacji, podanych w Tabelach 35 ÷ 37, wiążących zmiany przenikalności elektrycznej wywołane polem elektrostatycznym z gatunkami zboża, stwierdzono silne (dodatnie) związanie dla ziarniaków jęczmienia i pszenicy o wilgotności  $w\% = 16,4\%$  (współczynnik korelacji  $\rho_{x,y} \approx 1$  w całym zakresie zmian natężenia pola) oraz dla wilgotności  $w\% = 18,2\%$  (w przedziale zmian natężenia pola  $< 0, 35 >$ ;  $\text{kV m}^{-1}$ ). W przypadku ziarniaków pszenicy i żyta najsilniejsze (dodatnie) związanie występuje dla wilgotności  $w\% = 11,5\%$  i  $w\% = 18,2\%$  (w całym zakresie zmian natężenia pola). W przypadku ziarniaków jęczmienia i żyta najsilniejsze korelacje dodatnie występują dla ziarniaków o wilgotnościach  $w\% = 11,5\%$  i  $w\% = 17,2\%$  (w całym zakresie zmian natężenia pola).
9. Badanie przeprowadzono do  $500 \text{ kV m}^{-1}$ . Powyżej  $500 \text{ kV m}^{-1}$  następowało przebicie elektryczne w kondensatorze pomiarowym napełnionym ziarnem.



Rys. 72. Zależność przenikalności elektrycznej ziarniaków jęczmienia oraz jej procentowej zmiany  $\Delta\epsilon$  od natężenia pola elektrostatycznego przy  $w\% = 17,2\%$ .

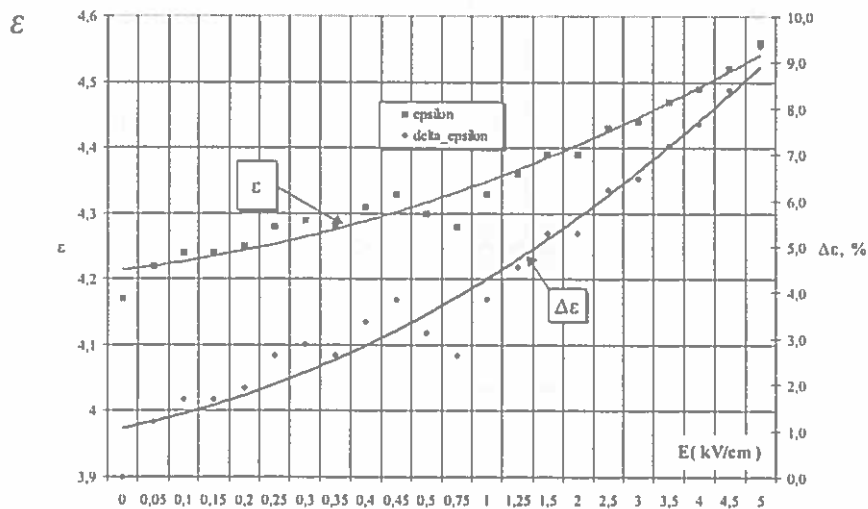
Fig. 72. The dependence of dielectric constant and its percentage change  $\Delta\epsilon$  for barley on electrostatic field intensity at  $w\% = 17,2\%$ .





Rys. 73. Zależność przenikalności elektrycznej ziarniaków pszenicy oraz jej procentowej zmiany  $\Delta\epsilon$  od natężenia pola elektrostatycznego przy  $w\% = 21$  %.

Fig. 73. The dependence of dielectric constant and its percentage change  $\Delta\epsilon$  for wheat on electrostatic field intensity at  $w\% = 21$  %.



Rys. 74. Zależność przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta oraz jej procentowej zmiany  $\Delta\epsilon$  od natężenia pola elektrostatycznego przy  $w\% = 13,4$  %.

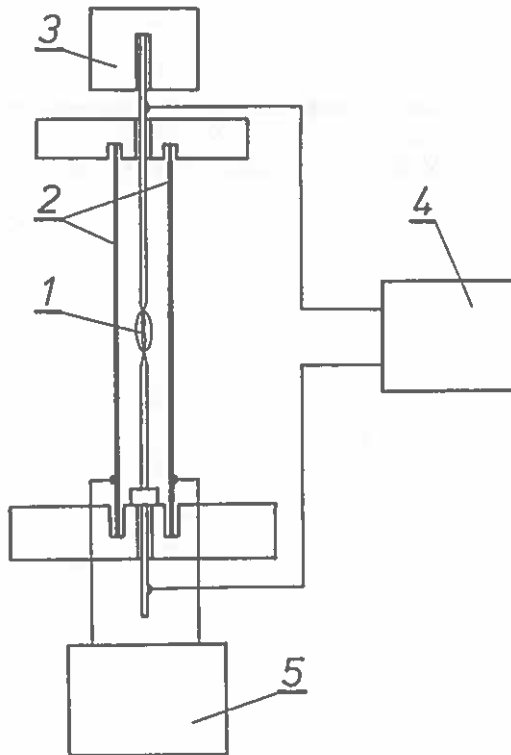
Fig. 74. The dependence of dielectric constant and its percentage change  $\Delta\epsilon$  for rye on electrostatic field intensity at  $w\% = 13,4$  %.

## 6.5. Zależność rezystancji ziarniaka zbóż od natężenia pola elektrostatycznego

### 6.5.1. Opis stanowiska do pomiaru rezystancji nasion zbóż w funkcji natężenia pola elektrostatycznego

Do określania zależności rezystancji ziarniaków zbóż od natężenia pola elektrostatycznego zaprojektowano specjalne stanowisko pomiarowe (Rys. 75) [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.



Rys. 75. 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].

Fig. 75. Resistance measuring system for grain in electrostatic field: 1 - grain, 2 - flat capacitor plates, 3 - pressure holder, 4 - resistance meter, 5 - dc HV supplier [1].

### 6.5.2. Metodyka pomiaru rezystancji ziarniaków w funkcji natężenia pola elektrostatycznego

- I. Przygotowanie komory klimatyzacyjnej
  - Wyregulowano w komorze zadaną wartość temperatury i wilgotności.
- II. Przygotowanie materiału badawczego
  - Materiał badawczy (ziarniaki zbóż) przygotowano analogicznie jak w punkcie 6.2.2.
  - Po wyjęciu materiału roślinnego z komory klimatyzacyjnej przygotowano próbki pomiarowe: wklejono ziarniaki za pomocą kleju przewodzącego do uchwytów pomiarowych (Rys. 75).
- III. Przeprowadzenie pomiarów
  - Umieszczano badane ziarniaki wewnątrz kondensatora pomiarowego.
  - Poddawano ziarniaki oddziaływaniu pola elektrostatycznego.
  - Mierzono rezystancję ziarniaków za pomocą miernika rezystancji.

### 6.5.3. Wyniki pomiarów rezystancji ziarniaków w funkcji natężenia pola elektrostatycznego

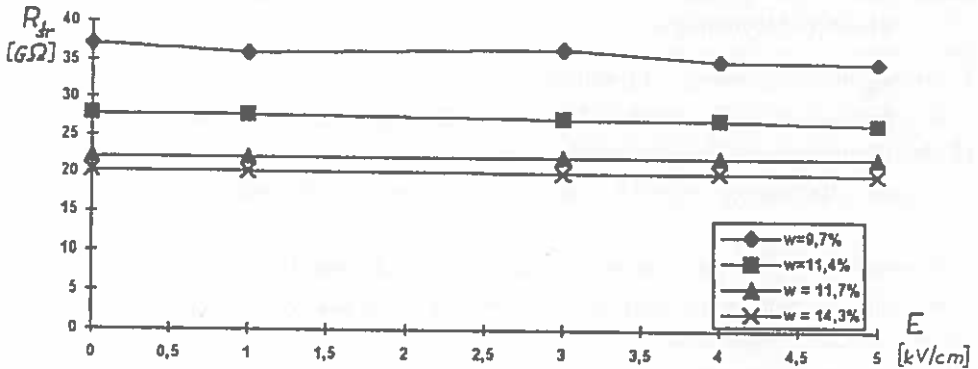
Wyniki pomiarów oraz wykres rezystancji ziarniaków w funkcji natężenia pola elektrostatycznego zostały przedstawione w Tabeli 38 i na Rys. 76.

**Tabela 38.** Wyniki pomiaru rezystancji ziarniaka w funkcji natężenia pola elektrostatycznego,  $T = 293 \text{ K}$

**Table 38.** Test results of grain resistance vs. electrostatic field intensity at  $T = 293 \text{ K}$

$w\%$	$R_{\text{sr}}^{\text{G}\Omega}$	$\delta_n$	$R_{\text{sr}}^{\text{G}\Omega}$	$\delta_n$	$R_{\text{sr}}^{\text{G}\Omega}$	$\delta_n$	$R_{\text{sr}}^{\text{G}\Omega}$	$\delta_n$	$R_{\text{sr}}^{\text{G}\Omega}$	$\delta_n$
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

Objaśnienia:  $R_{\text{sr}}$  - wartość średnia rezystancji ziarniaka dla danej wartości natężenia pola,  $\delta_n$  - odchylenie standardowe dla danej próby,  $w_{\text{z}}$  - wilgotność ziarniaka.



Rys. 76. Zależność rezystancji ziarniaka od natężenia pola elektrostatycznego (ziarniak mocowany za pomocą przyklejanych elektrod drutowych) [1].

Fig. 76. The dependence of grain resistance on electrostatic field intensity (grain fixed by glued wire electrodes) [1].

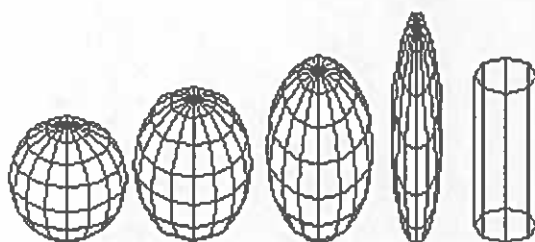
#### 6.5.4. Wnioski z badań rezystancji ziarniaków w funkcji natężenia pola elektrostatycznego

Na podstawie wyników badań rezystancji ziarniaków w funkcji natężenia pola elektrostatycznego stwierdzono (Rys. 76, Tabela 38):

1. wartość rezystancji ziarniaka zależy od natężenia pola elektrostatycznego;
2. wpływ pola elektrostatycznego jest większy dla ziarniaków o mniejszej wilgotności ( $w\% \leq 11,4\%$ );
3. przy wzroście natężenia pola elektrostatycznego rezystancja ziarniaka zmniejsza się;
4. zmiana rezystancji ma w przybliżeniu charakter liniowy; największa zmiana rezystancji przy wzroście natężenia od 0 do  $500 \text{ kV m}^{-1}$  wynosiła ok. 5,5 %.

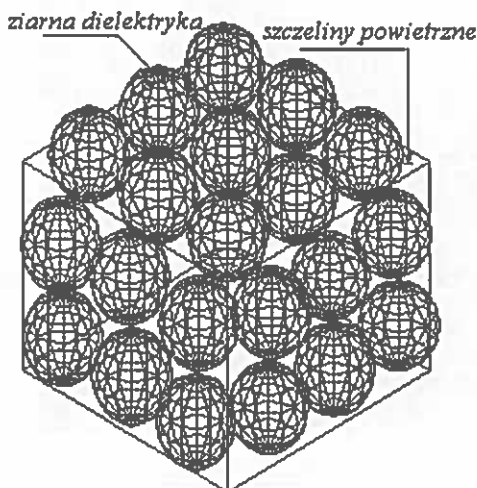
## 7. WPŁYW SFERYCZNOŚCI CZĄSTEK DIELEKTRYCZNYCH NA PRZENIKALNOŚĆ ELEKTRYCZNĄ MIESZANINY DIELEKTRYK-POWIETRZE

Ziarniaki zbóż z uwagi na różnorodność występujących w przyrodzie odmian są opisywane często różnymi figurami geometrycznymi, począwszy od kuli (odpowiada ziarnom rzepaku) aż do sferoidy wydłużonej, która modeluje ziarniaki pszenicy, żyta i jęczmienia (Rys. 77). Umieszczenie takiego medium w naczyniu - kondensatorze pomiarowym powoduje, że oprócz warstwowości tego dielektryka wynikającej z jego naturalnej struktury (Rys. 78) mamy do czynienia z drugim medium, np. powietrzem lub cieczą.



Rys. 77. Modele geometryczne ziarniaka.

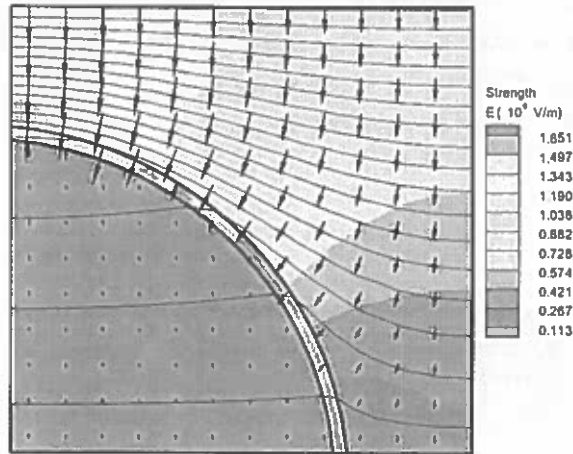
Fig. 77. Grain geometric models.



Rys. 78. Badane medium w kondensatorze pomiarowym.

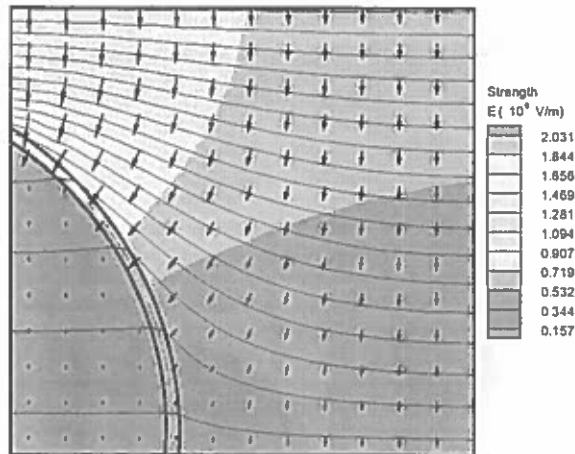
Fig. 78. Medium tested in a measuring capacitor.

Obraz pola elektrostatycznego w ziarniaku i otaczającym go środowisku o  $\epsilon = 1$ , otrzymany za pomocą programu Quick Field 3.4 Student's Version, w zależności od współczynnika sferyczności ziarniaka oraz przenikalności elektrycznej jego warstw, został przedstawiony na Rys. 79 ÷ 84. Otrzymany tą drogą obraz pola w dielektryku warstwowym przeczy podanemu przez Taruškina (Rys. 1).



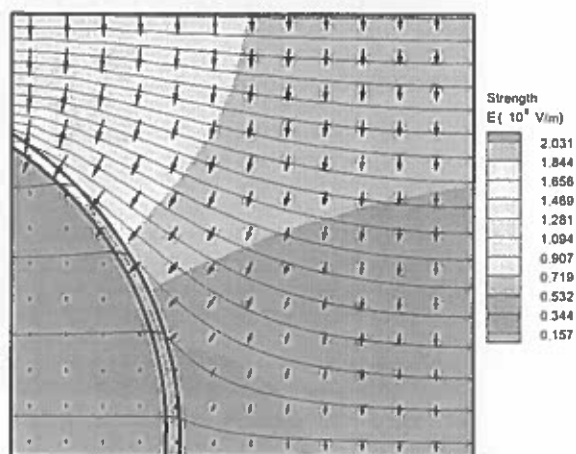
Rys. 79. Hipotetyczny obraz pola elektrycznego w ziarnie i jego środowisku:  $B_{II}=1, \epsilon_{wewn} > \epsilon_{zewn} (10 > 5)$ , linie ekwipotencjalne i wektory natężenia pola elektrycznego.

Fig. 79. Electric field distribution in a grain and its environment:  $B_{II}=1, \epsilon_{wewn} > \epsilon_{zewn} (10 > 5)$ , equipotential lines and electric field intensity vectors.



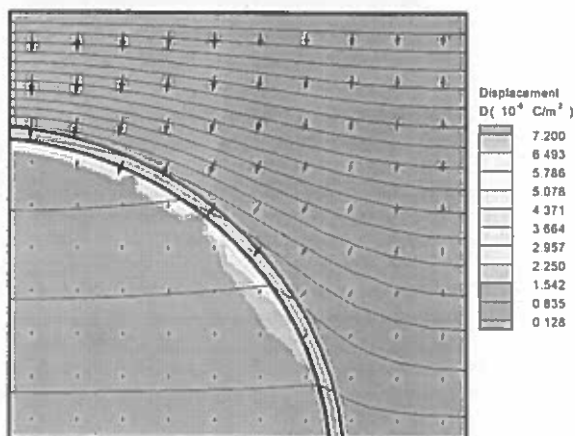
Rys. 80. Hipotetyczny obraz pola elektrycznego w ziarnie i jego środowisku:  $B_{II}= 0,5; \epsilon_{wewn} > \epsilon_{zewn} (10 > 5)$ ; linie ekwipotencjalne i wektory natężenia pola elektrycznego.

Fig. 80. Electric field distribution in a grain and its environment:  $B_{II}= 0.5; \epsilon_{wewn} > \epsilon_{zewn} (10 > 5)$ ; equipotential lines and electric field intensity vectors.



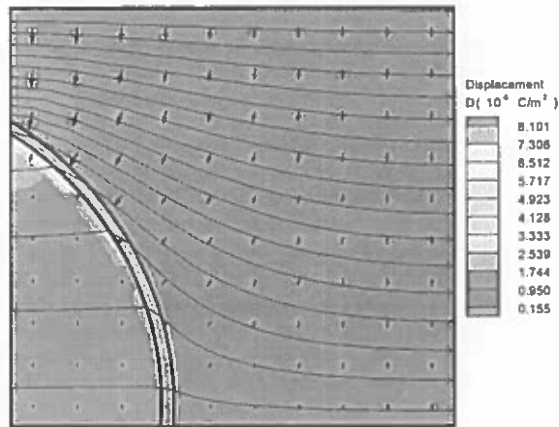
Rys. 81. Hipotetyczny obraz pola elektrycznego w ziarnie i jego środowisku:  $B_H=0,25$ ;  $\epsilon_{wzwn} > \epsilon_{zewn}$  ( $10 > 5$ ); linie ekwipotencjalne i wektory natężenia pola elektrycznego.

Fig. 81. Electric field distribution in a grain and its environment:  $B_H=0.25$ ;  $\epsilon_{wzwn} > \epsilon_{zewn}$  ( $10 > 5$ ); equipotential lines and electric field intensity vectors.



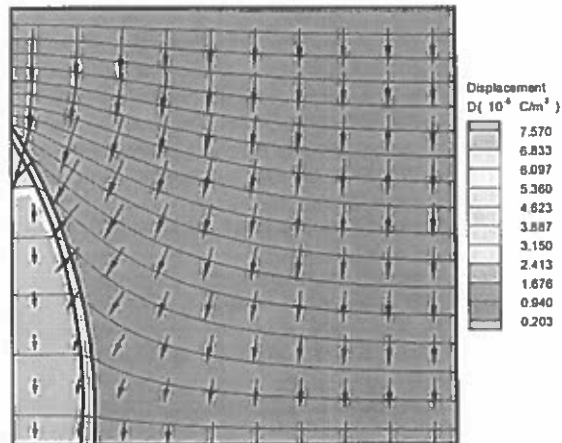
Rys. 82. Hipotetyczny obraz pola elektrycznego w ziarnie i jego środowisku:  $B_H=1$ ;  $\epsilon_{wzwn} > \epsilon_{zewn}$  ( $10 > 2$ ); linie ekwipotencjalne i wektory indukcji.

Fig. 82. Electric field distribution in a grain and its environment:  $B_H=1$ ;  $\epsilon_{wzwn} > \epsilon_{zewn}$  ( $10 > 2$ ); equipotential lines and electric displacement vectors.



Rys. 83. Hipotetyczny obraz pola elektrycznego w ziarnie i jego środowisku:  $B_H=0,5$ ;  $\epsilon_{wewn.}>\epsilon_{zewn.}$  ( $10>2$ ); linie ekwipotencjalne i wektory indukcji.

Fig. 83. Electric field distribution in a grain and its environment:  $B_H= 0,5$ ;  $\epsilon_{wewn.}>\epsilon_{zewn.}$  ( $10>2$ ); equipotential lines and electric displacement vectors.



Rys. 84. Hipotetyczny obraz pola elektrycznego w ziarnie i jego środowisku:  $B_H=0,25$ ;  $\epsilon_{wewn.}>\epsilon_{zewn.}$  ( $10>2$ ); linie ekwipotencjalne i wektory indukcji.

Fig. 84. Electric field distribution in a grain and its environment:  $B_H= 0,25$ ;  $\epsilon_{wewn.}>\epsilon_{zewn.}$  ( $10>2$ ); equipotential lines and electric displacement vectors.



Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i obliczeń można stwierdzić, że:

1. Ze wzrostem  $B_w$  cząstek dielektryka, rośnie przenikalność elektryczna mieszaniny dielektryk-powietrze.
2. Ze wzrostem  $B_w$  cząstek dielektryka rośnie ilość dielektryka w zajmowanym przez niego obszarze i maleje ilość powietrza.

Poznanie zależności między przenikalnością elektryczną dielektryka a przenikalnością mieszaniny powietrze-dielektryk jest bardzo ważne, gdy do pomiaru mogą być stosowane metodyki oparte na pomiarze mieszaniny, a chcemy uzyskać dane na temat przenikalności dielektryka. Mamy z tym do czynienia w przypadku ziarniaków zbóż.

## 8. ANALIZA PORÓWNAWCZA

## 8.1. Określanie wpływu ciśnienia oraz natężenia pola elektrostatycznego na przenikalność elektryczną ziarniaków

W celu określenia zależności pomiędzy wpływem naprężeń mechanicznych i naprężeń pochodzących od pola elektrostatycznego na przenikalność elektryczną ziarniaków zbóż zastosowano podobnie jak w podrozdziałach 6.2.5 i 6.4.5 funkcję korelacji [110]. Umożliwia ona stwierdzenie, czy istnieje zależność między zmianami przenikalności elektrycznej wywołanymi naprężeniami mechanicznymi i polem elektrostatycznym. Badanie tej funkcji przeprowadzono przedziałami w celu wyznaczenia przedziałów, dla których zbieżność ta jest najsilniejsza. W Tabelach 39÷53 zostały obliczone z pomiarów wartości współczynnika korelacji  $\rho_{x,y}$  dla przenikalności elektrycznej ziarniaków zbóż, określające związki między wartością zmian przenikalności elektrycznej pod wpływem naprężeń mechanicznych i pod wpływem pola elektrycznego. Przyciemnionym tłem w kolumnach  $\langle p \rangle$  i  $\langle E \rangle$  tabel zostały oznaczone przedziały, dla których uzyskano największe współczynniki korelacji pomiędzy mierzonymi wartościami.

W Tabelach 39÷52 przyjęto następujące przedziały zmian ciśnienia i natężenia pola elektrostatycznego:  $\langle 0 \div 784560 \rangle$  - przedział ciśnienia (Pa);  $\langle 0 \div 500 \rangle$  - przedział natężenia pola ( $\text{kV m}^{-1}$ );  $\varepsilon_p$  - przenikalność elektryczna przy zmianie ciśnienia;  $\varepsilon_E$  - przenikalność elektryczna przy zmianie natężenia pola elektrostatycznego; znak " - " w kolumnach  $\langle p \rangle$  i  $\langle E \rangle$  oznacza (od - do). Brak zgodności  $\varepsilon_{p=0}$  oraz  $\varepsilon_{E=0}$  można uzasadnić błędem systematycznym wynikającym z zastosowania dwóch kondensatorów pomiarowych oraz przesunięciem w czasie między pomiarami.

**T a b e l a 39.** Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziarniaków jęczmienia o wilgotności  $w_{\%} = 11,5 \%$ , w funkcji ciśnienia i natężenia pola elektrostatycznego

**T a b l e 39.** Correlation coefficients  $\rho$  vs. pressure and electrostatic field intensity for barley of moisture content  $w_{\%} = 11.5 \%$

p(Pa) x98070	$\varepsilon_p$	E(kV m <sup>-1</sup> ) x100	$\varepsilon_E$	$\rho$	$\langle p \rangle$ (Pa) x98070	$\langle E \rangle$ (kV m <sup>-1</sup> ) x100
0	3,27	0,00	3,39	-0,133	0-8	0-1
0,2	3,27	0,05	3,39	-0,071	0-8	0,05-1,25
0,4	3,27	0,10	3,41	0,049	0-8	0,1-1,5
0,6	3,27	0,15	3,41	0,380	0-8	0,15-2
0,8	3,26	0,20	3,41	0,360	0-8	0,2-2,5
1	3,26	0,25	3,46	0,356	0-8	0,25-3,0
2	3,26	0,30	3,42	0,551	0-8	0,3-3,5

T a b e l a 39. Kontynuacja  
T a b l e 39. Continuation

$p(\text{Pa})$ $\times 98070$	$\varepsilon_p$	$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\varepsilon_E$	$\rho$	$\langle p \rangle (\text{Pa})$ $\times 98070$	$\langle E \rangle (\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$
3	3,27	0,35	3,40	0,657	0-8	0,35-4
4	3,27	0,40	3,41	0,407	0-8	0,4-4,5
5	3,27	0,45	3,41	0,279	0-8	0,45-5,0
6	3,27	0,50	3,42	0,325	0,2-8	0,5-5,0
7	3,28	0,75	3,41	0,505	0,4-8	0,5-4,5
8	3,28	1,00	3,42	0,510	0,6-8	1-5
		1,25	3,42	0,487	0,8-8	1,25-5
		1,50	3,42	0,399	1-8	1,5-5
		2,00	3,43	0,318	2-8	2-5
		2,50	3,42	0,217	3-8	2,5-5
		3,00	3,43	0,036	4-8	3-5
		3,50	3,44	-0,306	5-8	3,5-5
		4,00	3,44	-0,254	6-8	4-5

T a b e l a 40. Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziarniaków jęczmienia o wilgotności  $w_w = 13,4\%$ , w funkcji ciśnienia i natężenia pola elektrostatycznego

T a b l e 40. Correlation coefficients  $\rho$  vs. pressure and electrostatic field intensity for barley of moisture content  $w_w = 13,4\%$

$p(\text{Pa})$ $\times 98070$	$\varepsilon_p$	$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\varepsilon_E$	$\rho$	$\langle p \rangle (\text{Pa})$ $\times 98070$	$\langle E \rangle (\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$
0	4,32	0,00	4,59	-0,561	0-8	0-1
0,2	4,32	0,05	4,56	-0,836	0-8	0,05-1,25
0,4	4,32	0,10	4,54	-0,746	0-8	0,1-1,5
0,6	4,31	0,15	4,57	-0,807	0-8	0,15-2
0,8	4,31	0,20	4,59	-0,735	0-8	0,2-2,5
1	4,30	0,25	4,58	-0,820	0-8	0,25-3,0
2	4,30	0,30	4,58	-0,716	0-8	0,3-3,5
3	4,30	0,35	4,58	-0,679	0-8	0,35-4
4	4,30	0,40	4,58	-0,595	0-8	0,4-4,5
5	4,30	0,45	4,63	-0,580	0-8	0,45-5,0
6	4,30	0,50	4,60	-0,824	0,2-8	0,5-5,0
7	4,30	0,75	4,61	-0,686	0,4-8	0,5-4,5
8	4,30	1,00	4,60	-0,831	0,6-8	1-5
		1,25	4,61	-0,762	0,8-8	1,25-5
		1,50	4,61	-0,710	1-8	1,5-5
		2,00	4,62	-0,621	2-8	2-5
		2,50	4,62	-0,604	3-8	2,5-5
		3,00	4,64	-0,574	4-8	3-5
		3,50	4,61	-0,598	5-8	3,5-5
		4,00	4,64	0,396	6-8	4-5

**T a b e l a 41.** Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziarniaków jęczmienia o wilgotności  $w_{\%} = 16,4 \%$ , w funkcji ciśnienia i natężenia pola elektrostatycznego

**T a b l e 41.** Correlation coefficients  $\rho$  vs. pressure and electrostatic field intensity for barley of moisture content  $w_{\%} = 16.4 \%$

$p(\text{Pa})$ $\times 98070$	$\epsilon_p$	$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\epsilon_E$	$\rho$	$\langle p \rangle (\text{Pa})$ $\times 98070$	$\langle E \rangle (\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$
0	5,57	0,00	5,65	-0,383	0-8	0-1
0,2	5,56	0,05	5,65	-0,423	0-8	0,05-1,25
0,4	5,51	0,10	5,65	-0,414	0-8	0,1-1,5
0,6	5,46	0,15	5,65	-0,458	0-8	0,15-2
0,8	5,13	0,20	5,66	-0,113	0-8	0,2-2,5
1	5,40	0,25	5,66	-0,366	0-8	0,25-3,0
2	5,30	0,30	5,66	-0,659	0-8	0,3-3,5
3	5,25	0,35	5,66	-0,650	0-8	0,35-4
4	5,19	0,40	5,64	-0,750	0-8	0,4-4,5
5	5,16	0,45	5,65	-0,738	0-8	0,45-5,0
6	5,12	0,50	5,66	-0,708	0,2-8	0,5-5,0
7	5,10	0,75	5,65	-0,669	0,4-8	0,5-4,5
8	5,09	1,00	5,67	-0,672	0,6-8	1-5
		1,25	5,67	-0,709	0,8-8	1,25-5
		1,50	5,66	-0,818	1-8	1,5-5
		2,00	5,67	-0,863	2-8	2-5
		2,50	5,66	-0,940	3-8	2,5-5
		3,00	5,67	-0,974	4-8	3-5
		3,50	5,69	-0,987	5-8	3,5-5
		4,00	5,71	-0,992	6-8	4-5

**T a b e l a 42.** Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziarniaków jęczmienia o wilgotności  $w_{\%} = 17,2 \%$ , w funkcji ciśnienia i natężenia pola elektrostatycznego

**T a b l e 42.** Correlation coefficients  $\rho$  vs. pressure and electrostatic field intensity for barley of moisture content  $w_{\%} = 17.2 \%$

$p(\text{Pa})$ $\times 98070$	$\epsilon_p$	$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\epsilon_E$	$\rho$	$\langle p \rangle (\text{Pa})$ $\times 98070$	$\langle E \rangle (\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$
0	5,63	0,00	5,68	-0,856	0-8	0-1
0,2	5,58	0,05	5,69	-0,757	0-8	0,05-1,25
0,4	5,52	0,10	5,69	-0,720	0-8	0,1-1,5
0,6	5,45	0,15	5,69	-0,692	0-8	0,15-2
0,8	5,41	0,20	5,70	-0,715	0-8	0,2-2,5
1	5,39	0,25	5,72	-0,715	0-8	0,25-3,0
2	5,30	0,30	5,72	-0,720	0-8	0,3-3,5
3	5,27	0,35	5,73	-0,779	0-8	0,35-4

T a b e l a 42. Kontynuacja  
T a b l e 42. Continuation

$p(\text{Pa})$ $\times 98070$	$\varepsilon_p$	$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\varepsilon_E$	$\rho$	$\langle p \rangle (\text{Pa})$ $\times 98070$	$\langle E \rangle (\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$
4	5,27	0,40	5,74	-0,808	0-8	0,4-4,5
5	5,27	0,45	5,72	-0,837	0-8	0,45-5,0
6	5,27	0,50	5,76	-0,824	0,2-8	0,5-5,0
7	5,27	0,75	5,76	-0,805	0,4-8	0,5-4,5
8	5,26	1,00	5,79	-0,801	0,6-8	1-5
		1,25	5,84	-0,740	0,8-8	1,25-5
		1,50	5,88	-0,657	1-8	1,5-5
		2,00	5,94	-0,672	2-8	2-5
		2,50	5,95	-0,739	3-8	2,5-5
		3,00	6,05	-0,552	4-8	3-5
		3,50	6,18	-0,881	5-8	3,5-5
		4,00	6,11	-0,893	6-8	4-5

T a b e l a 43. Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziarniaków jęczmienia o wilgotności  $w_{\%} = 18,2 \%$ , w funkcji ciśnienia i natężenia pola elektrostatycznego

T a b l e 43. Correlation coefficients  $\rho$  vs. pressure and electrostatic field intensity for barley of moisture content  $w_{\%} = 18.2 \%$

$p(\text{Pa})$ $\times 98070$	$\varepsilon_p$	$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\varepsilon_E$	$\rho$	$\langle p \rangle (\text{Pa})$ $\times 98070$	$\langle E \rangle (\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$
0	8,82	0,00	9,14	-0,884	0-8	0-1
0,2	8,79	0,05	9,18	-0,855	0-8	0,05-1,25
0,4	8,76	0,10	9,23	-0,851	0-8	0,1-1,5
0,6	8,69	0,15	9,26	-0,880	0-8	0,15-2
0,8	8,65	0,20	9,29	-0,905	0-8	0,2-2,5
1	8,63	0,25	9,28	-0,881	0-8	0,25-3,0
2	8,38	0,30	9,31	-0,893	0-8	0,3-3,5
3	8,28	0,35	9,33	-0,885	0-8	0,35-4
4	8,27	0,40	9,35	-0,800	0-8	0,4-4,5
5	8,31	0,45	9,36	-0,777	0-8	0,45-5,0
6	8,35	0,50	9,37	-0,727	0,2-8	0,5-5,0
7	8,37	0,75	9,40	-0,674	0,4-8	0,5-4,5
8	8,40	1,00	9,40	-0,523	0,6-8	1-5
		1,25	9,45	-0,300	0,8-8	1,25-5
		1,50	9,44	-0,399	1-8	1,5-5
		2,00	9,42	-0,810	2-8	2-5
		2,50	9,44	-1,000	3-8	2,5-5

**Tabela 44.** Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziarniaków pszenicy o wilgotności  $w_w = 10,5\%$ , w funkcji ciśnienia i natężenia pola elektrostatycznego

**Table 44.** Correlation coefficients  $\rho$  vs. pressure and electrostatic field intensity for wheat of moisture content  $w_w = 10.5\%$

$p(\text{Pa})$ $\times 98070$	$\varepsilon_p$	$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\varepsilon E$	$\rho$	$\langle p \rangle (\text{Pa})$ $\times 98070$	$\langle E \rangle (\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$
0	3,29	0,00	3,45	-0,405	0-8	0-1
0,2	3,29	0,05	3,45	0,048	0-8	0,05-1,25
0,4	3,28	0,10	3,48	0,307	0-8	0,1-1,5
0,6	3,29	0,15	3,47	0,216	0-8	0,15-2
0,8	3,29	0,20	3,48	0,595	0-8	0,2-2,5
1	3,28	0,25	3,54	0,364	0-8	0,25-3,0
2	3,28	0,30	3,50	0,071	0-8	0,3-3,5
3	3,28	0,35	3,51	0,118	0-8	0,35-4
4	3,28	0,40	3,51	-0,074	0-8	0,4-4,5
5	3,28	0,45	3,48	-0,051	0-8	0,45-5,0
6	3,29	0,50	3,48	0,015	0,2-8	0,5-5,0
7	3,29	0,75	3,48	-0,024	0,4-8	0,5-4,5
8	3,29	1,00	3,50	-0,259	0,6-8	1-5
		1,25	3,50	-0,226	0,8-8	1,25-5
		1,50	3,51	-0,082	1-8	1,5-5
		2,00	3,51	-0,101	2-8	2-5
		2,50	3,52	-0,218	3-8	2,5-5
		3,00	3,52	-0,137	4-8	3-5
		3,50	3,51	0,334	5-8	3,5-5
		4,00	3,52	-0,008	6-8	4-5

**Tabela 45.** Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziarniaków pszenicy o wilgotności  $w_w = 13,4\%$ , w funkcji ciśnienia i natężenia pola elektrostatycznego

**Table 45.** Correlation coefficients  $\rho$  vs. pressure and electrostatic field intensity for wheat of moisture content  $w_w = 13.4\%$

$p(\text{Pa})$ $\times 98070$	$\varepsilon_p$	$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\varepsilon E$	$\rho$	$\langle p \rangle (\text{Pa})$ $\times 98070$	$\langle E \rangle (\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$
0	3,72	0,00	3,74	0,715	0-8	0-1
0,2	3,74	0,05	3,68	0,557	0-8	0,05-1,25
0,4	3,76	0,10	3,74	0,290	0-8	0,1-1,5
0,6	3,78	0,15	3,78	-0,107	0-8	0,15-2
0,8	3,79	0,20	3,81	-0,466	0-8	0,2-2,5
1	3,79	0,25	3,96	-0,651	0-8	0,25-3,0
2	3,80	0,30	3,91	-0,450	0-8	0,3-3,5
3	3,80	0,35	3,83	-0,334	0-8	0,35-4

Tabela 45. Kontynuacja  
Table 45. Continuation

$p(\text{Pa})$ $\times 98070$	$\varepsilon_p$	$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\varepsilon E$	$\rho$	$\langle p \rangle (\text{Pa})$ $\times 98070$	$\langle E \rangle (\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$
4	3,80	0,40	3,94	-0,357	0-8	0,4-4,5
5	3,81	0,45	3,85	0,253	0-8	0,45-5,0
6	3,81	0,50	3,84	0,387	0,2-8	0,5-5,0
7	3,81	0,75	3,81	0,287	0,4-8	0,5-4,5
8	3,81	1,00	3,83	0,746	0,6-8	1-5
		1,25	3,74	0,896	0,8-8	1,25-5
		1,50	3,80	0,828	1-8	1,5-5
		2,00	3,79	0,777	2-8	2-5
		2,50	3,85	0,653	3-8	2,5-5
		3,00	3,87	0,607	4-8	3-5
		3,50	3,88	0,938	5-8	3,5-5
		4,00	3,84	0,955	6-8	4-5

Tabela 46. Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziarniaków pszenicy o wilgotności  $w_w = 16,1\%$ , w funkcji ciśnienia i natężenia pola elektrostatycznego

Table 46. Correlation coefficients  $\rho$  vs. pressure and electrostatic field intensity for wheat of moisture content  $w_w = 16.1\%$

$p(\text{Pa})$ $\times 98070$	$\varepsilon_p$	$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\varepsilon E$	$\rho$	$\langle p \rangle (\text{Pa})$ $\times 98070$	$\langle E \rangle (\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$
0	3,88	0,00	3,87	-0,461	0-8	0-1
0,2	3,87	0,05	3,88	-0,527	0-8	0,05-1,25
0,4	3,84	0,10	3,86	-0,698	0-8	0,1-1,5
0,6	3,81	0,15	3,87	-0,727	0-8	0,15-2
0,8	3,78	0,20	3,87	-0,734	0-8	0,2-2,5
1	3,77	0,25	3,87	-0,743	0-8	0,25-3,0
2	3,71	0,30	3,87	-0,815	0-8	0,3-3,5
3	3,67	0,35	3,88	-0,731	0-8	0,35-4
4	3,64	0,40	3,87	-0,782	0-8	0,4-4,5
5	3,61	0,45	3,87	-0,804	0-8	0,45-5,0
6	3,59	0,50	3,88	-0,797	0,2-8	0,5-5,0
7	3,58	0,75	3,87	-0,754	0,4-8	0,5-4,5
8	3,57	1,00	3,89	-0,808	0,6-8	1-5
		1,25	3,88	-0,826	0,8-8	1,25-5
		1,50	3,88	-0,822	1-8	1,5-5
		2,00	3,89	-0,861	2-8	2-5
		2,50	3,89	-0,929	3-8	2,5-5
		3,00	3,90	-0,960	4-8	3-5
		3,50	3,91	-0,987	5-8	3,5-5
		4,00	3,96	-0,962	6-8	4-5

**Tabela 47.** Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziarniaków pszenicy o wilgotności  $w_{\%} = 17,4\%$ , w funkcji ciśnienia i natężenia pola elektrostatycznego

**Table 47.** Correlation coefficients  $\rho$  vs. pressure and electrostatic field intensity for wheat of moisture content  $w_{\%} = 17,4\%$

$p(\text{Pa})$ $\times 98070$	$\varepsilon_p$	$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\varepsilon_E$	$\rho$	$\langle p \rangle (\text{Pa})$ $\times 98070$	$\langle E \rangle (\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$
0	4,05	0,00	4,03	-0.819	0-8	0-1
0,2	4,02	0,05	4,06	-0.869	0-8	0,05-1,25
0,4	4,03	0,10	4,10	-0.961	0-8	0,1-1,5
0,6	4,01	0,15	4,11	-0.973	0-8	0,15-2
0,8	4,00	0,20	4,12	-0.970	0-8	0,2-2,5
1	3,99	0,25	4,12	-0.961	0-8	0,25-3,0
2	3,98	0,30	4,12	-0.930	0-8	0,3-3,5
3	3,95	0,35	4,13	-0.862	0-8	0,35-4
4	3,93	0,40	4,13	-0.781	0-8	0,4-4,5
5	3,90	0,45	4,14	-0.785	0-8	0,45-5,0
6	3,87	0,50	4,15	-0.738	0,2-8	0,5-5,0
7	3,84	0,75	4,15	-0.725	0,4-8	0,5-4,5
8	3,84	1,00	4,15	-0.631	0,6-8	1-5
		1,25	4,16	-0.524	0,8-8	1,25-5
		1,50	4,16	-0.396	1-8	1,5-5
		2,00	4,17	-0.251	2-8	2-5
		2,50	4,17	-0.216	3-8	2,5-5
		3,00	4,17	-0.320	4-8	3-5
		3,50	4,17	-0.437	5-8	3,5-5
		4,00	4,16	-0.569	6-8	4-5

**Tabela 48.** Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziarniaków pszenicy o wilgotności  $w_{\%} = 21\%$ , w funkcji ciśnienia i natężenia pola elektrostatycznego

**Table 48.** Correlation coefficients  $\rho$  vs. pressure and electrostatic field intensity for wheat of moisture content  $w_{\%} = 21\%$

$p(\text{Pa})$ $\times 98070$	$\varepsilon_p$	$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\varepsilon_E$	$\rho$	$\langle p \rangle (\text{Pa})$ $\times 98070$	$\langle E \rangle (\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$
0	4,71	0,00	4,71	-0,865	0-8	0-1
0,2	4,69	0,05	4,75	-0,880	0-8	0,05-1,25
0,4	4,64	0,10	4,79	-0,880	0-8	0,1-1,5
0,6	4,62	0,15	4,85	-0,885	0-8	0,15-2
0,8	4,60	0,20	4,86	-0,895	0-8	0,2-2,5
1	4,50	0,25	4,80	-0,875	0-8	0,25-3,0
2	4,46	0,30	4,85	-0,875	0-8	0,3-3,5
3	4,44	0,35	4,88	-0,883	0-8	0,35-4



Tabela 48. Kontynuacja  
Table 48. Continuation

$p(\text{Pa})$ $\times 98070$	$\varepsilon_p$	$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\varepsilon_E$	$\rho$	$\langle p \rangle (\text{Pa})$ $\times 98070$	$\langle E \rangle (\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$
4	4,40	0,40	4,96	-0,804	0-8	0,4-4,5
5	4,34	0,45	5,15	-0,715	0-8	0,45-5,0
6	4,25	0,50	5,00	-0,888	0,2-8	0,5-5,0
7	4,18	0,75	5,01	-0,947	0,4-8	0,5-4,5
8	4,16	1,00	5,08	-0,781	0,6-8	1-5
		1,25	5,13	-0,708	0,8-8	1,25-5
		1,50	5,10	-0,986	1-8	1,5-5
		2,00	5,14	-0,986	2-8	2-5
		2,50	5,21	-1,000	3-8	2,5-5

Tabela 49. Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziarniaków żyta o wilgotności  $w_{\%} = 10,9\%$ , w funkcji ciśnienia i natężenia pola elektrostatycznego

Table 49. Correlation coefficients  $\rho$  vs. pressure and electrostatic field intensity for rye of moisture content  $w_{\%} = 10.9\%$

$p(\text{Pa})$ $\times 98070$	$\varepsilon_p$	$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\varepsilon_E$	$\rho$	$\langle p \rangle (\text{Pa})$ $\times 98070$	$\langle E \rangle (\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$
0	4,12	0,00	4,11	-0,397	0-8	0-1
0,2	4,12	0,05	4,18	-0,196	0-8	0,05-1,25
0,4	4,13	0,10	4,22	-0,001	0-8	0,1-1,5
0,6	4,12	0,15	4,21	0,187	0-8	0,15-2
0,8	4,12	0,20	4,22	0,128	0-8	0,2-2,5
1	4,11	0,25	4,29	0,015	0-8	0,25-3,0
2	4,10	0,30	4,25	-0,465	0-8	0,3-3,5
3	4,09	0,35	4,26	-0,693	0-8	0,35-4
4	4,10	0,40	4,26	-0,781	0-8	0,4-4,5
5	4,09	0,45	4,21	-0,834	0-8	0,45-5,0
6	4,09	0,50	4,22	-0,818	0,2-8	0,5-5,0
7	4,09	0,75	4,21	-0,865	0,4-8	0,5-4,5
8	4,09	1,00	4,23	-0,652	0,6-8	1-5
		1,25	4,25	-0,418	0,8-8	1,25-5
		1,50	4,25	-0,351	1-8	1,5-5
		2,00	4,26	0,128	2-8	2-5
		2,50	4,26	0,438	3-8	2,5-5
		3,00	4,27	0,453	4-8	3-5
		3,50	4,25	0,011	5-8	3,5-5
		4,00	4,27	0,966	6-8	4-5

**T a b e l a 50.** Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziarniaków żyta o wilgotności  $w_{\%} = 13,4\%$ , w funkcji ciśnienia i natężenia pola elektrostatycznego

**T a b l e 50.** Correlation coefficients  $\rho$  vs. pressure and electrostatic field intensity for rye of moisture content  $w_{\%} = 13.4\%$

$p(\text{Pa})$ $\times 98070$	$\varepsilon_p$	$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\varepsilon_E$	$\rho$	$\langle p \rangle (\text{Pa})$ $\times 98070$	$\langle E \rangle (\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$
0	4,15	0,00	4,17	-0,831	0-8	0-1
0,2	4,13	0,05	4,22	-0,859	0-8	0,05-1,25
0,4	4,15	0,10	4,24	-0,865	0-8	0,1-1,5
0,6	4,12	0,15	4,24	-0,850	0-8	0,15-2
0,8	4,11	0,20	4,25	-0,856	0-8	0,2-2,5
1	4,11	0,25	4,28	-0,913	0-8	0,25-3,0
2	4,02	0,30	4,29	-0,962	0-8	0,3-3,5
3	3,97	0,35	4,28	-0,967	0-8	0,35-4
4	3,94	0,40	4,31	-0,967	0-8	0,4-4,5
5	3,91	0,45	4,33	-0,962	0-8	0,45-5,0
6	3,89	0,50	4,30	-0,962	0,2-8	0,5-5,0
7	3,86	0,75	4,28	-0,965	0,4-8	0,5-4,5
8	3,84	1,00	4,33	-0,955	0,6-8	1-5
		1,25	4,36	-0,944	0,8-8	1,25-5
		1,50	4,39	-0,923	1-8	1,5-5
		2,00	4,39	-0,989	2-8	2-5
		2,50	4,43	-0,987	3-8	2,5-5
		3,00	4,44	-0,996	4-8	3-5
		3,50	4,47	-0,998	5-8	3,5-5
		4,00	4,49	-0,999	6-8	4-5

**T a b e l a 51.** Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziarniaków żyta o wilgotności  $w_{\%} = 16,4\%$ , w funkcji ciśnienia i natężenia pola elektrostatycznego

**T a b l e 51.** Correlation coefficients  $\rho$  vs. pressure and electrostatic field intensity for rye of moisture content  $w_{\%} = 16.4\%$

$p(\text{Pa})$ $\times 98070$	$\varepsilon_p$	$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\varepsilon_E$	$\rho$	$\langle p \rangle (\text{Pa})$ $\times 98070$	$\langle E \rangle (\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$
0	4,41	0,00	4,43	-0,503	0-8	0-1
0,2	4,41	0,05	4,47	-0,256	0-8	0,05-1,25
0,4	4,39	0,10	4,49	-0,014	0-8	0,1-1,5
0,6	4,38	0,15	4,76	0,143	0-8	0,15-2
0,8	4,37	0,20	4,54	-0,842	0-8	0,2-2,5
1	4,37	0,25	4,56	-0,827	0-8	0,25-3,0
2	4,35	0,30	4,57	-0,861	0-8	0,3-3,5
3	4,35	0,35	4,55	-0,841	0-8	0,35-4

T a b e l a 51. Kontynuacja  
T a b l e 51. Continuation

$p(\text{Pa})$ $\times 98070$	$\varepsilon_p$	$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\varepsilon E$	$\rho$	$\langle p \rangle (\text{Pa})$ $\times 98070$	$\langle E \rangle (\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$
4	4,35	0,40	4,58	-0,822	0-8	0,4-4,5
5	4,34	0,45	4,60	-0,819	0-8	0,45-5,0
6	4,34	0,50	4,60	-0,854	0,2-8	0,5-5,0
7	4,33	0,75	4,57	-0,873	0,4-8	0,5-4,5
8	4,33	1,00	4,61	-0,906	0,6-8	1-5
		1,25	4,59	-0,956	0,8-8	1,25-5
		1,50	4,60	-0,940	1-8	1,5-5
		2,00	4,62	-0,923	2-8	2-5
		2,50	4,65	-0,892	3-8	2,5-5
		3,00	4,65	-0,874	4-8	3-5
		3,50	4,67	-0,851	5-8	3,5-5
		4,00	4,66	-0,983	6-8	4-5

T a b e l a 52. Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziarniaków żyta o wilgotności  $w_{\%} = 18,6\%$ , w funkcji ciśnienia i natężenia pola elektrostatycznego

T a b l e 52. Correlation coefficients  $\rho$  vs. pressure and electrostatic field intensity for rye of moisture content  $w_{\%} = 18.6\%$

$p(\text{Pa})$ $\times 98070$	$\varepsilon_p$	$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\varepsilon E$	$\rho$	$\langle p \rangle (\text{Pa})$ $\times 98070$	$\langle E \rangle (\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$
0	4,54	0,00	4,55	-0,831	0-8	0-1
0,2	4,52	0,05	4,60	-0,860	0-8	0,05-1,25
0,4	4,53	0,10	4,62	-0,866	0-8	0,1-1,5
0,6	4,50	0,15	4,62	-0,851	0-8	0,15-2
0,8	4,50	0,20	4,63	-0,857	0-8	0,2-2,5
1	4,50	0,25	4,66	-0,913	0-8	0,25-3,0
2	4,39	0,30	4,67	-0,963	0-8	0,3-3,5
3	4,35	0,35	4,67	-0,967	0-8	0,35-4
4	4,31	0,40	4,70	-0,967	0-8	0,4-4,5
5	4,28	0,45	4,72	-0,962	0-8	0,45-5,0
6	4,25	0,50	4,69	-0,962	0,2-8	0,5-5,0
7	4,22	0,75	4,67	-0,965	0,4-8	0,5-4,5
8	4,20	1,00	4,72	-0,954	0,6-8	1-5
		1,25	4,75	-0,944	0,8-8	1,25-5
		1,50	4,79	-0,923	1-8	1,5-5
		2,00	4,78	-0,989	2-8	2-5
		2,50	4,82	-0,987	3-8	2,5-5
		3,00	4,84	-0,995	4-8	3-5
		3,50	4,87	-0,998	5-8	3,5-5
		4,00	4,89	-0,999	6-8	4-5

**T a b e l a 53.** Współczynniki korelacji  $\rho$  dla ziarniaków żyta o wilgotności  $w\% = 21\%$ , w funkcji ciśnienia i natężenia pola elektrostatycznego

**T a b l e 53.** Correlation coefficients  $\rho$  vs. pressure and electrostatic field intensity for rye of moisture content  $w\% = 21\%$

$p(\text{Pa})$ $\times 98070$	$\varepsilon_p$	$E(\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$	$\varepsilon_E$	$\rho$	$\langle p \rangle (\text{Pa})$ $\times 98070$	$\langle E \rangle (\text{kV m}^{-1})$ $\times 100$
0	4,76	0,00	4,77	-0,830	0-8	0-1
0,2	4,73	0,05	4,81	-0,857	0-8	0,05-1,25
0,4	4,75	0,10	4,85	-0,847	0-8	0,1-1,5
0,6	4,71	0,15	4,83	-0,854	0-8	0,15-2
0,8	4,68	0,20	4,86	-0,895	0-8	0,2-2,5
1	4,68	0,25	4,90	-0,934	0-8	0,25-3,0
2	4,60	0,30	4,89	-0,963	0-8	0,3-3,5
3	4,56	0,35	4,90	-0,963	0-8	0,35-4
4	4,52	0,40	4,93	-0,970	0-8	0,4-4,5
5	4,50	0,45	4,91	-0,977	0-8	0,45-5,0
6	4,47	0,50	4,90	-0,973	0,2-8	0,5-5,0
7	4,45	0,75	4,90	-0,968	0,4-8	0,5-4,5
8	4,43	1,00	4,97	-0,978	0,6-8	1-5
		1,25	4,99	-0,971	0,8-8	1,25-5
		1,50	5,01	-0,960	1-8	1,5-5
		2,00	5,02	-0,991	2-8	2-5
		2,50	5,05	-0,987	3-8	2,5-5
		3,00	5,08	-0,974	4-8	3-5
		3,50	5,11	-0,944	5-8	3,5-5
		4,00	5,14	-0,893	6-8	4-5

Ze względu na zmienny charakter otrzymanych przebiegów przenikalności elektrycznej  $\varepsilon$ , zbiór wartości przenikalności elektrycznej ziarniaków dla zmiennych wartości ciśnienia i zbiór przenikalności dla zmiennych wartości natężenia pola były badane w Tabelach 39÷53 przedziałami.

Otrzymano następujące wyniki tych badań:

1. Dla ziarniaków jęczmienia o wilgotnościach  $w\% > 13,4\%$  stwierdzono korelację ujemną między zmianami ich przenikalności elektrycznej wywołanymi ciśnieniem i polem elektrostatycznym. Najsilniejszą ( $\rho_{x,y} = -0,940$ ) przy zmianie ciśnienia  $294210 \div 784560$  Pa i natężenia pola  $250 \div 500$   $\text{kV m}^{-1}$ , dla ziarniaków o wilgotności  $w\% = 16,4\%$  (przyjęto współczynnik korelacji dla porównywanych zbiorów o liczbie elementów  $\geq 5$  w celu uzyskania bardziej wiarygodnych wyników). Dla ziarniaków jęczmienia o wilgotności  $w\% = 11,5\%$  stwierdzono najsilniejszą korelację dodatnią ( $\rho_{x,y} = 0,657$ ) przy zmianie ciśnienia  $0 \div 784560$  Pa i natężenia pola  $35 \div 400$   $\text{kV m}^{-1}$ ;

2. W przypadku pszenicy najsilniejsza korelacja dodatnia ( $\rho_{x,y} = 0,595$ ) istnieje między zmianami przenikalności uzyskanymi przy zmianie ciśnienia w przedziale  $0 \div 784560$  Pa i natężenia pola w przedziale  $20 \div 250$  kV m<sup>-1</sup>, dla ziarniaków o wilgotności  $w\% = 10,5$  % oraz  $\rho_{x,y} = 0,896$  między przedziałami  $78456 \div 784560$  Pa i  $125 \div 500$  kV m<sup>-1</sup>, dla ziarniaków o wilgotności  $w\% = 13,4$  %. Korelację ujemną ( $\rho_{x,y} = -0,986$ ) stwierdzono dla przedziałów  $98070 \div 784560$  Pa i  $125 \div 500$  kV m<sup>-1</sup>, dla ziarniaków o wilgotności  $w\% = 21$  %;
3. Ziarniaki żyta o wilgotności  $w\% = 9,7$  % wykazały korelację dodatnią ( $\rho_{x,y} = 0,453$ ) dla przedziałów  $392280 \div 784560$  Pa i  $300 \div 500$  kV m<sup>-1</sup>, zaś korelację ujemną ( $\rho_{x,y} = -0,996$ ) w przedziałach  $392280 \div 784560$  Pa i  $300 \div 500$  kV m<sup>-1</sup> dla wilgotności  $w\% = 13,4$  % oraz ( $\rho_{x,y} = -0,995$ ) dla przedziałów  $392280 \div 784560$  Pa i  $300 \div 500$  kV m<sup>-1</sup>, dla wilgotności  $w\% = 18,6$  %.

Z uwagi na odmienny charakter zmian przenikalności elektrycznej ziarniaków pod wpływem ciśnienia i pola elektrostatycznego oraz występowanie korelacji ujemnych można przypuszczać, że naprężenia strykcyjne wywołują naprężenia mechaniczne typu rozciągającego.

## 8.2. Relacje między przenikalnością elektryczną mieszaniny ziarniaki - powietrze a przenikalnością ziarniaków

Ze względu na bardzo mały obiekt badawczy zmierzona przenikalność elektryczna dotyczy mieszaniny ziarniaki - powietrze. Przenikalność elektryczną nasion otrzymano korzystając z zależności (8) [102] podanej w rozdziale 6 niniejszej pracy. W Tabelach 54 ÷ 59 zostały podane, dla skrajnych wilgotności, przenikalności elektryczne mieszaniny ziarniaki - powietrze oraz przenikalności samych ziarniaków obliczone według zależności (8) dla eksperymentalnie wyznaczonego współczynnika koncentracji  $x$ , oznaczone jako  $\epsilon_1$  oraz określonej, wyselekcjonowanej pod względem wymiarów geometrycznych frakcji (opisanej w 4 rozdziale niniejszej pracy) ziarniaków zbóż. Przenikalności elektryczne, oznaczone  $\epsilon_2$ , odpowiadają maksymalnej koncentracji powietrza w badanej próbce. Są to wartości jakie można by uzyskać stosując zależność (8), jednak wartości  $\epsilon_2$  w rzeczywistości nie występują, gdyż ziarniaki poszczególnych gatunków zbóż mają wymiary geometryczne przeciętne w swoich gatunkach. Zostały jednak podane w tabelach w celu pokazania wartości granicznej przenikalności elektrycznej ziarniaków. Podane w tabelach wartości współczynnika koncentracji  $x = < \min >$  odpowiadają koncentracji powietrza dla badanej próby ziarniaków, zaś  $x = < \max >$  odpowiadają maksymalnej koncentracji powietrza w materiale roślinnym (ze względu na uzasadnioną wartość przenikalności wg zależności (8)). Oznacza to, że dla wartości współczynnika koncentracji poza przedziałem  $< 0,39 \ 0,5 >$  zależność (8) przyjmuje ujemne wartości.

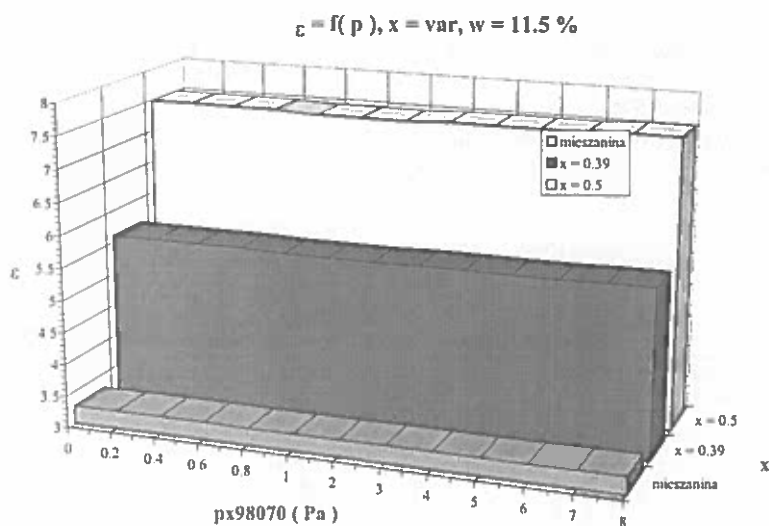
**T a b e l a 54.** Przenikalność elektryczna mieszaniny: ziarniaki jęczmienia - powietrze:  $\epsilon_{m\acute{s}redni}$  oraz ziarniaków:  $\epsilon_1, \epsilon_2$  dla wilgotności  $w_{\%} = 11,5$  i  $18,2\%$  i skrajnych wartości współczynnika koncentracji powietrza  $x$  przy zmianie ciśnienia

**T a b l e 54.** Dielectric constant for barley grain - air mixture:  $\epsilon_{m\acute{s}redni}$  and grain:  $\epsilon_1, \epsilon_2$  at moisture content values  $w_{\%} = 11.5$  and  $18.2\%$  and extreme values of air content  $x$  at pressure change

p(Pa) x 98070	$w_{\%} = 11,5$			$w_{\%} = 18,2$		
	$\epsilon_{m\acute{s}redni}$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_{m\acute{s}redni}$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$
		$x=0,39$	$x=0,5$		$x=0,39$	$x=0,5$
0	3,27	5,61	7,50	8,82	18,52	27,94
0,2	3,27	5,61	7,50	8,79	18,45	27,83
0,4	3,27	5,61	7,50	8,76	18,38	27,71
0,6	3,27	5,61	7,50	8,69	18,21	27,44
0,8	3,26	5,59	7,46	8,65	18,12	27,29
1	3,26	5,59	7,46	8,63	18,07	27,21

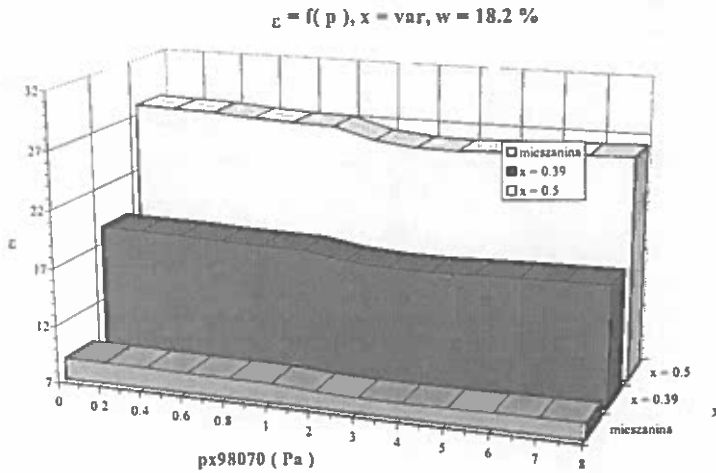
Tabela 54. Kontynuacja  
Table 54. Continuation

p(Pa) x 98070	w <sub>w</sub> = 11,5			w <sub>w</sub> = 18,2		
	<i>ε<sub>m</sub>średni</i>	ε <sub>1</sub>	ε <sub>2</sub>	<i>ε<sub>m</sub>średni</i>	ε <sub>1</sub>	ε <sub>2</sub>
		x=0,39	x=0,5		x=0,39	x=0,5
2	3,26	5,59	7,46	8,38	17,48	26,25
3	3,27	5,61	7,50	8,28	17,24	25,87
4	3,27	5,61	7,50	8,27	17,21	25,83
5	3,27	5,61	7,50	8,31	17,31	25,99
6	3,27	5,61	7,50	8,35	17,40	26,14
7	3,28	5,63	7,53	8,37	17,45	26,22
8	3,28	5,63	7,53	8,40	17,52	26,33



Rys. 85. Wpływ koncentracji powietrza na przenikalność elektryczną ziarniaków jęczmienia przy zmianie ciśnienia dla  $w_w = 11,5\%$ .

Fig. 85. The influence of air content on dielectric constant for barley at pressure change at  $w_w = 11,5\%$ .



Rys. 86. Wpływ koncentracji powietrza na przenikalność elektryczną ziarniaków jęczmienia przy zmianie ciśnienia dla  $w_{w_0} = 18,2\%$ .

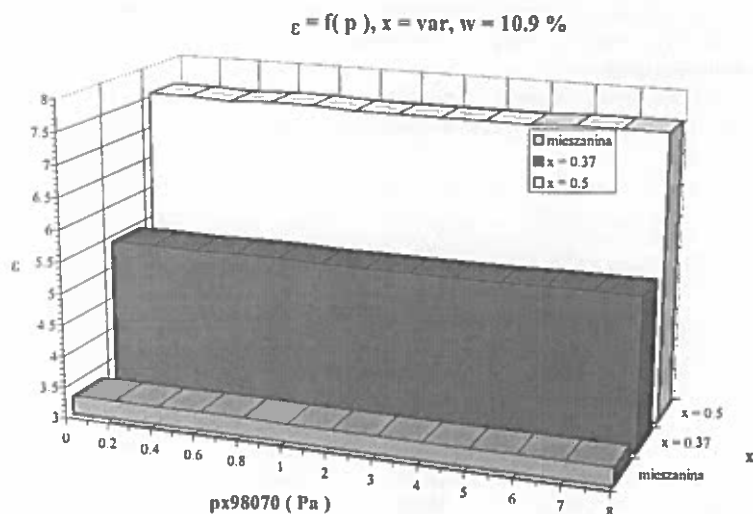
Fig. 86. The influence of air content on dielectric constant for barley at pressure change at  $w_{w_0} = 18,2\%$ .

**T a b e l a 55.** Przenikalność elektryczna mieszaniny: ziarniaki pszenicy - powietrze:  $\epsilon_{m\acute{s}redni}$  oraz ziarniaków:  $\epsilon_1, \epsilon_2$  dla wilgotności  $w_{w_0} = 10,9$  i 21% i skrajnych wartości współczynnika koncentracji powietrza  $x$  przy zmianie ciśnienia

**T a b l e 55.** Dielectric constant for wheat grain - air mixture:  $\epsilon_{m\acute{s}redni}$  and grain:  $\epsilon_1, \epsilon_2$  at moisture content values  $w_{w_0} = 10.9$  and 21% and extreme values of air content  $x$  at pressure change

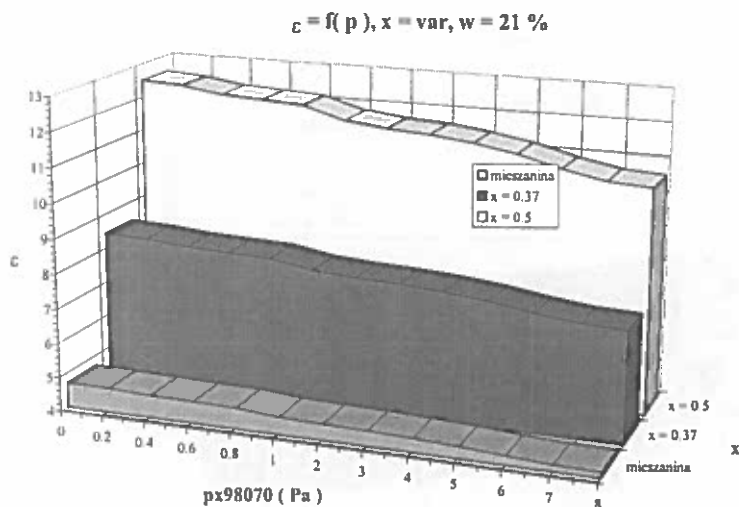
p(Pa) x 98070	$w_{w_0} = 10,9$			$w_{w_0} = 21$		
	$\epsilon_{m\acute{s}redni}$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_{m\acute{s}redni}$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$
		x=0,37	x=0,5		x=0,37	x=0,5
0	3,29	5,42	7,56	4,71	8,45	12,52
0,2	3,29	5,42	7,56	4,69	8,40	12,45
0,4	3,28	5,40	7,53	4,64	8,29	12,27
0,6	3,29	5,42	7,56	4,62	8,25	12,20
0,8	3,29	5,42	7,56	4,6	8,21	12,13
1	3,28	5,40	7,53	4,5	7,99	11,77
2	3,28	5,40	7,53	4,46	7,91	11,63
3	3,28	5,40	7,53	4,44	7,86	11,56
4	3,28	5,40	7,53	4,4	7,78	11,41
5	3,28	5,40	7,53	4,34	7,65	11,20
6	3,29	5,42	7,56	4,25	7,46	10,88
7	3,29	5,42	7,56	4,18	7,31	10,63
8	3,29	5,42	7,56	4,16	7,26	10,56





Rys. 87. Wpływ koncentracji powietrza na przenikalność elektryczną ziarniaków pszenicy przy zmianie ciśnienia dla  $w_w = 10,9\%$

Fig. 87. The influence of air content on dielectric constant for wheat at pressure change at  $w_w = 10.9\%$



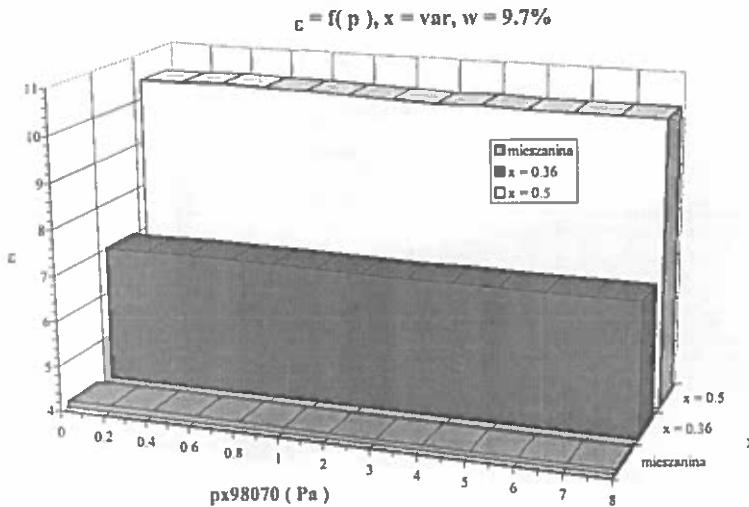
Rys. 88. Wpływ koncentracji powietrza na przenikalność elektryczną ziarniaków pszenicy przy zmianie ciśnienia dla  $w_w = 21\%$ .

Fig. 88. The influence of air content on dielectric constant for wheat at pressure change at  $w_w = 21\%$ .

**T a b e l a 56.** Przenikalność elektryczna mieszaniny: ziarniak żyta - powietrze:  $\epsilon_{m\acute{s}redni}$  oraz ziarniaków:  $\epsilon_1, \epsilon_2$  dla wilgotności  $w_{\%} = 9,7$  i 21 % i skrajnych wartości współczynnika koncentracji powietrza  $x$  przy zmianie ciśnienia

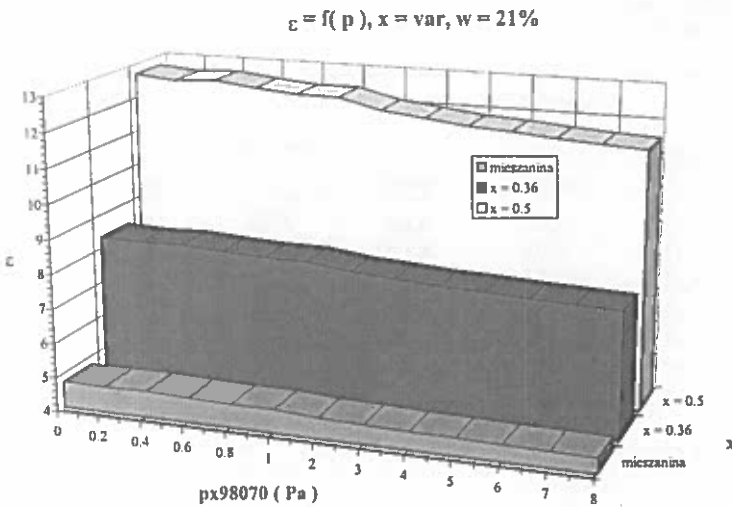
**T a b l e 56.** Dielectric constant for rye grain - air mixture:  $\epsilon_{m\acute{s}redni}$  and grain:  $\epsilon_1, \epsilon_2$  at moisture content values  $w_{\%} = 9.7$  and 21 % and extreme values of air content  $x$  at pressure change

p(Pa) x 98070	$w_{\%} = 9,7$			$w_{\%} = 21$		
	$\epsilon_{m\acute{s}redni}$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_{m\acute{s}redni}$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$
		$x=0,36$	$x=0,5$		$x=0,36$	$x=0,5$
0	4,12	7,02	10,42	4,76	8,35	12,70
0,2	4,12	7,02	10,42	4,73	8,29	12,59
0,4	4,13	7,04	10,46	4,75	8,33	12,67
0,6	4,12	7,02	10,42	4,71	8,25	12,52
0,8	4,12	7,02	10,42	4,68	8,19	12,41
1	4,11	7,00	10,39	4,68	8,19	12,41
2	4,10	6,98	10,35	4,6	8,02	12,13
3	4,09	6,96	10,32	4,56	7,93	11,98
4	4,10	6,98	10,35	4,52	7,85	11,84
5	4,09	6,96	10,32	4,5	7,81	11,77
6	4,09	6,96	10,32	4,47	7,75	11,66
7	4,09	6,96	10,32	4,45	7,70	11,59
8	4,09	6,96	10,32	4,43	7,66	11,52



**Rys. 89.** Wpływ koncentracji powietrza na przenikalność elektryczną ziarniaków żyta przy zmianie ciśnienia dla  $w_{\%} = 9,7$  %.

**Fig. 89.** The influence of air content on dielectric constant for rye at pressure change at  $w_{\%} = 9.7$  %.



Rys. 90. Wpływ koncentracji powietrza na przenikalność elektryczną ziarniaków żyta przy zmianie ciśnienia dla  $w_{\%} = 21\%$ .

Fig. 90. The influence of air content on dielectric constant for rye at pressure change at  $w_{\%} = 21\%$ .

T a b e l a 57. Przenikalność elektryczna mieszaniny: ziarniaków jęczmienia - powietrze:  $\epsilon_{m\text{średni}}$  oraz ziarniaków:  $\epsilon_1, \epsilon_2$  dla wilgotności  $w_{\%} = 11,5$  i  $18,2\%$  i skrajnych wartości współczynnika koncentracji powietrza  $x$  przy zmianie natężenia pola elektrostatycznego

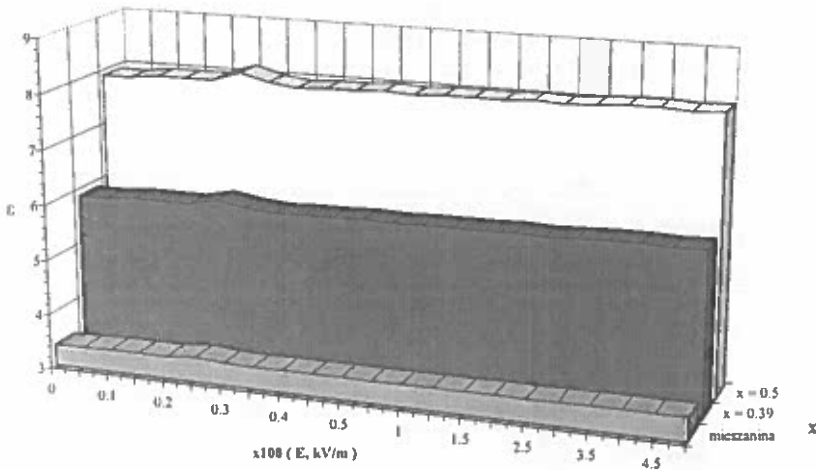
T a b l e 57. Dielectric constant for barley grain - air mixture:  $\epsilon_{m\text{średni}}$  and grain:  $\epsilon_1, \epsilon_2$  at moisture content values  $w_{\%} = 11.5$  and  $18.2\%$  and extreme values of air content  $x$  at electrostatic field intensity change

E (kV m <sup>-1</sup> )	w <sub>%</sub> = 11,5			w <sub>%</sub> = 18,2		
	$\epsilon_{m\text{średni}}$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_{m\text{średni}}$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$
		x=0,39	x=0,5		x=0,39	x=0,5
0	3,39	5,88	7,90	9,14	19,28	29,18
5	3,39	5,88	7,90	9,18	19,37	29,33
10	3,41	5,92	7,97	9,23	19,49	29,52
15	3,41	5,92	7,97	9,26	19,56	29,64
20	3,41	5,92	7,97	9,29	19,63	29,75
25	3,46	6,03	8,14	9,28	19,61	29,72
30	3,42	5,94	8,00	9,31	19,68	29,83
35	3,4	5,90	7,93	9,33	19,73	29,91
40	3,41	5,92	7,97	9,35	19,78	29,99
45	3,41	5,92	7,97	9,36	19,80	30,02
50	3,42	5,94	8,00	9,37	19,82	30,06
75	3,41	5,92	7,97	9,4	19,90	30,18
100	3,42	5,94	8,00	9,4	19,90	30,18

Tabela 57. Kontynuacja  
Table 57. Continuation

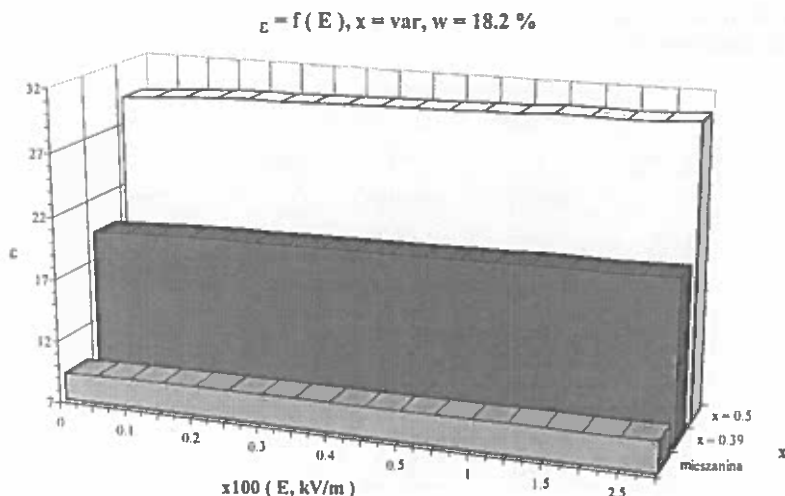
E (kV m <sup>-1</sup> )	w <sub>z</sub> = 11,5			w <sub>z</sub> = 18,2		
	ε <sub>średni</sub>	ε <sub>1</sub>	ε <sub>2</sub>	ε <sub>średni</sub>	ε <sub>1</sub>	ε <sub>2</sub>
		x=0,39	x=0,5		x=0,39	x=0,5
125	3,42	5,94	8,00	9,45	20,01	30,37
150	3,42	5,94	8,00	9,44	19,99	30,33
200	3,43	5,96	8,03	9,42	19,94	30,26
250	3,42	5,94	8,00	9,44	19,99	30,33
300	3,43	5,96	8,03	9,49	20,11	30,53
350	3,44	5,99	8,07			
400	3,44	5,99	8,07			
450	3,43	5,96	8,03			
500	3,44	5,99	8,07			

$$\varepsilon = f(E), x = \text{var}, w = 11.5\%$$



Rys. 91. Wpływ koncentracji powietrza na przenikalność elektryczną ziemiaków jęczmienia przy zmianie natężenia pola elektrostatycznego dla  $w_z = 11.5\%$ .

Fig. 91. The influence of air content on dielectric constant for barley at electrostatic field intensity change at  $w_z = 11.5\%$ .



Rys. 92. Wpływ koncentracji powietrza na przenikalność elektryczną ziemiaków jęczmienia przy zmianie natężenia pola elektrostatycznego dla  $w_{\%} = 18,2\%$ .

Fig. 92. The influence of air content on dielectric constant for barley at electrostatic field intensity change at  $w_{\%} = 18,2\%$ .

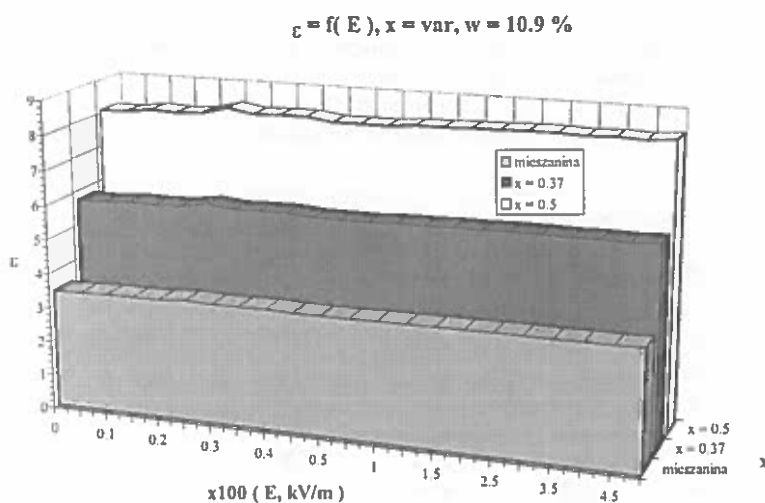
**T a b e l a 58.** Przenikalność elektryczna mieszaniny: ziemiaki pszenicy - powietrze:  $\epsilon_{m\acute{s}redni}$  oraz ziemiaków:  $\epsilon_1, \epsilon_2$  dla wilgotności  $w_{\%} = 10,9$  i 21 % i skrajnych wartości współczynnika koncentracji powietrza  $x$  przy zmianie natężenia pola elektrostatycznego

**T a b l e 58.** Dielectric constant for wheat grain - air mixture:  $\epsilon_{m\acute{s}redni}$  and grain:  $\epsilon_1, \epsilon_2$  at moisture content values  $w_{\%} = 10.9$  and 21 % and extreme values of air content  $x$  at electrostatic field intensity change

E (kV m <sup>-1</sup> )	w <sub>%</sub> = 10,9			w <sub>%</sub> = 21		
	$\epsilon_{m\acute{s}redni}$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_{m\acute{s}redni}$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$
		x=0,37	x=0,5		x=0,37	x=0,5
0	3,45	5,75	8,10	4,71	8,45	12,52
5	3,45	5,75	8,10	4,75	8,53	12,67
10	3,48	5,82	8,20	4,79	8,62	12,81
15	3,47	5,80	8,17	4,85	8,75	13,03
20	3,48	5,82	8,20	4,86	8,77	13,06
25	3,54	5,94	8,41	4,8	8,64	12,85
30	3,50	5,86	8,27	4,85	8,75	13,03
35	3,51	5,88	8,31	4,88	8,81	13,14
40	3,51	5,88	8,31	4,96	8,99	13,43
45	3,48	5,82	8,20	5,15	9,40	14,12
50	3,48	5,82	8,20	5,00	9,07	13,57
75	3,48	5,82	8,20	5,01	9,10	13,61
100	3,50	5,86	8,27	5,08	9,25	13,86

Tabela 58. Kontynuacja  
Table 58. Continuation

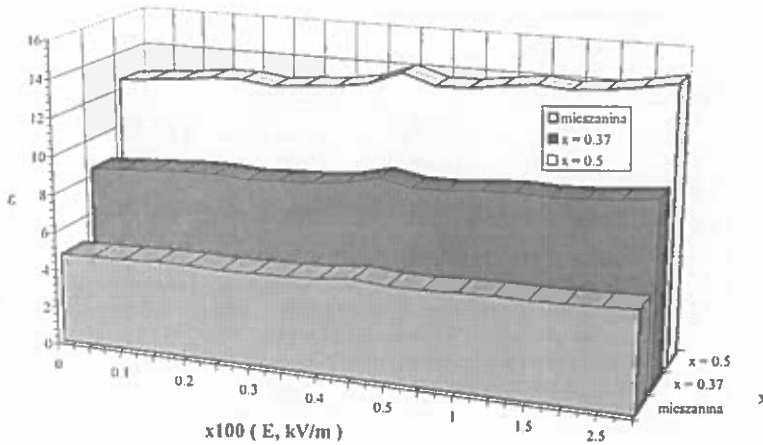
E (kV m <sup>-1</sup> )	w <sub>z</sub> = 10,9			w <sub>z</sub> = 21		
	$\epsilon_{m\acute{s}redni}$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_{m\acute{s}redni}$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$
		x=0,37	x=0,5		x=0,37	x=0,5
125	3,50	5,86	8,27	5,13	9,36	14,04
150	3,51	5,88	8,31	5,10	9,29	13,94
200	3,51	5,88	8,31	5,14	9,38	14,08
250	3,52	5,90	8,34	5,21	9,53	14,34
300	3,52	5,90	8,34	5,30	9,72	14,67
350	3,51	5,88	8,31			
400	3,52	5,90	8,34			
450	3,51	5,88	8,31			
500	3,53	5,92	8,37			



Rys. 93. Wpływ koncentracji powietrza na przenikalność elektryczną ziemiaków pszenicy przy zmianie natężenia pola elektrostatycznego dla w<sub>z</sub> = 10,9 %.

Fig. 93. The influence of air content on dielectric constant for wheat at electrostatic field intensity change at w<sub>z</sub> = 10.9 %.

$$c = f(E), x = \text{var}, w = 21\%$$



Rys. 94. Wpływ koncentracji powietrza na przenikalność elektryczną ziemiaków pszenicy przy zmianie natężenia pola elektrostatycznego dla  $w_{\%} = 21\%$ .

Fig. 94. The influence of air content on dielectric constant for wheat at electrostatic field intensity change at  $w_{\%} = 21\%$ .

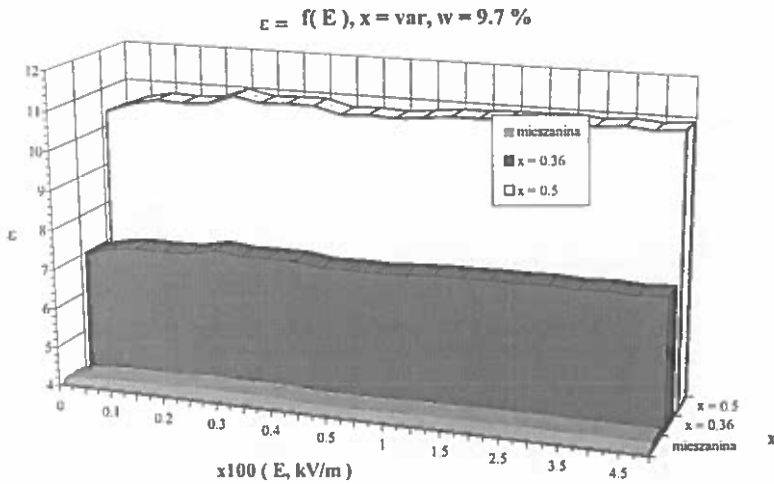
T a b e l a 59. Przenikalność elektryczna mieszaniny: ziemiaki żyta - powietrze:  $\epsilon_{m\acute{s}redni}$  oraz ziemiaków:  $\epsilon_1, \epsilon_2$  dla wilgotności  $w_{\%} = 9,7$  i  $21\%$  i skrajnych wartości współczynnika koncentracji powietrza  $x$  przy zmianie natężenia pola elektrostatycznego

T a b l e 59. Dielectric constant for rye grain - air mixture:  $\epsilon_{m\acute{s}redni}$  and grain:  $\epsilon_1, \epsilon_2$  at moisture content values  $w_{\%} = 9.7$  and  $21\%$  and extreme values of air content  $x$  at electrostatic field intensity change

E (kV m <sup>-1</sup> )	w <sub>%</sub> = 9,7			w <sub>%</sub> = 21		
	$\epsilon_{m\acute{s}redni}$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_{m\acute{s}redni}$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$
		x=0,36	x=0,5		x=0,36	x=0,5
0	4,11	7,00	10,39	4,77	8,37	12,74
5	4,18	7,14	10,63	4,81	8,46	12,88
10	4,22	7,23	10,77	4,85	8,54	13,03
15	4,21	7,20	10,74	4,83	8,50	12,96
20	4,22	7,23	10,77	4,86	8,56	13,06
25	4,29	7,37	11,02	4,90	8,65	13,21
30	4,25	7,29	10,88	4,89	8,63	13,17
35	4,26	7,31	10,92	4,90	8,65	13,21
40	4,26	7,31	10,92	4,93	8,71	13,32
45	4,21	7,20	10,74	4,91	8,67	13,24
50	4,22	7,23	10,77	4,90	8,65	13,21
75	4,21	7,20	10,74	4,90	8,65	13,21
100	4,23	7,25	10,81	4,97	8,79	13,46

Tabela 59. Kontynuacja  
Table 59. Continuation

E (kV m <sup>-1</sup> )	w <sub>z</sub> = 9,7			w <sub>z</sub> = 21		
	<i>ε</i> <sub>m</sub> średni	<i>ε</i> <sub>1</sub>	<i>ε</i> <sub>2</sub>	<i>ε</i> <sub>m</sub> średni	<i>ε</i> <sub>1</sub>	<i>ε</i> <sub>2</sub>
		x=0,36	x=0,5		x=0,36	x=0,5
125	4,25	7,29	10,88	4,99	8,84	13,54
150	4,25	7,29	10,88	5,01	8,88	13,61
200	4,26	7,31	10,92	5,02	8,90	13,64
250	4,26	7,31	10,92	5,05	8,96	13,75
300	4,27	7,33	10,95	5,08	9,03	13,86
350	4,25	7,29	10,88	5,11	9,09	13,97
400	4,27	7,33	10,95	5,14	9,15	14,08
450	4,25	7,29	10,88	5,16	9,19	14,15
500	4,27	7,33	10,95	5,16	9,19	14,15

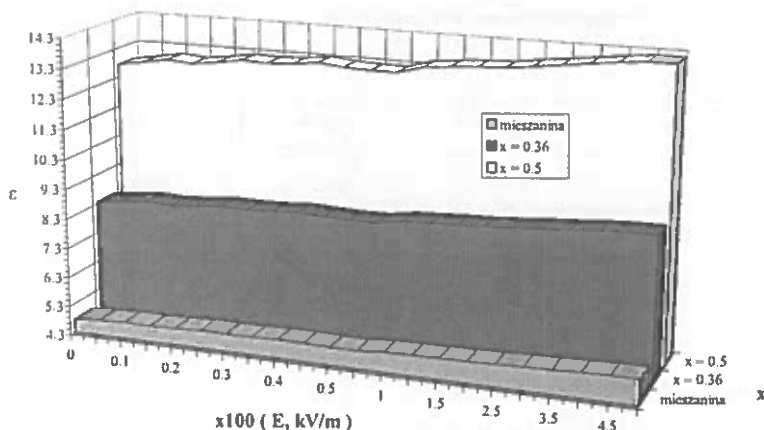


Rys. 95. Wpływ koncentracji powietrza na przenikalność elektryczną ziemiaków żyta przy zmianie natężenia pola elektrostatycznego dla  $w_z = 9,7\%$ .

Fig. 95. The influence of air content on dielectric constant for rye at electrostatic field intensity change at  $w_z = 9.7\%$ .



$$\epsilon = f(E, x = \text{var}, w = 21\%)$$



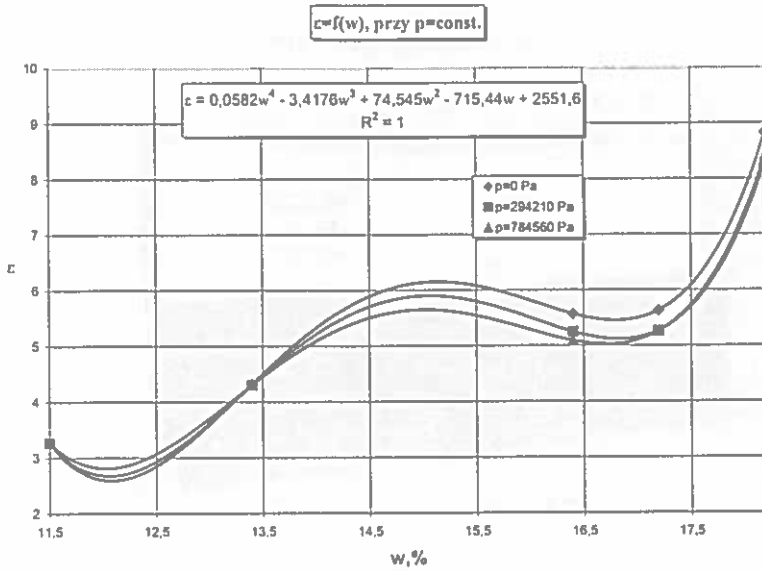
Rys. 96. Wpływ koncentracji powietrza na przenikalność elektryczną ziarniaków żyta przy zmianie natężenia pola elektrostatycznego dla  $w_{\text{sk}} = 21\%$ .

Fig. 96. The influence of air content on dielectric constant for rye at electrostatic field intensity change at  $w_{\text{sk}} = 21\%$ .

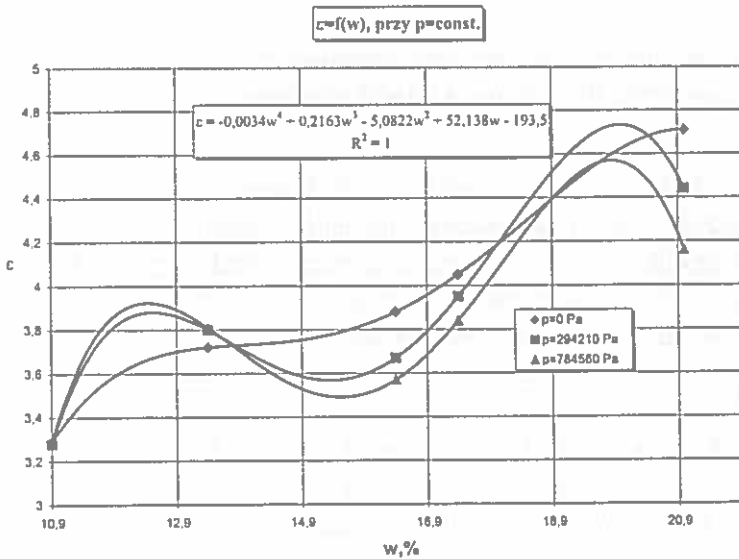
### 8.3. Wpływ wilgotności na zmianę przenikalności elektrycznej mieszaniny ziarniaki - powietrze przy stałej wartości ciśnienia

W niniejszym rozdziale zostały przedstawione na wykresach przebiegi zależności przenikalności elektrycznej mieszaniny: ziarniaki - powietrze, w funkcji wilgotności dla kilku wybranych wartości ciśnienia. Analiza tych wykresów pozwala na zbadanie wpływu wilgotności ziarniaków na zmiany ich przenikalności elektrycznej pod działaniem zewnętrznych naprężeń mechanicznych. Na wykresach zostały przedstawione również równania regresji oraz wartości R - kwadrat (stopień wiarygodności), który pomaga określić linię najlepszego dopasowania. Wartość R - kwadrat bliska 0 wskazuje niską zgodność, wartość bliska 1 wskazuje wysoką zgodność, a zatem wiarygodność linii trendu.

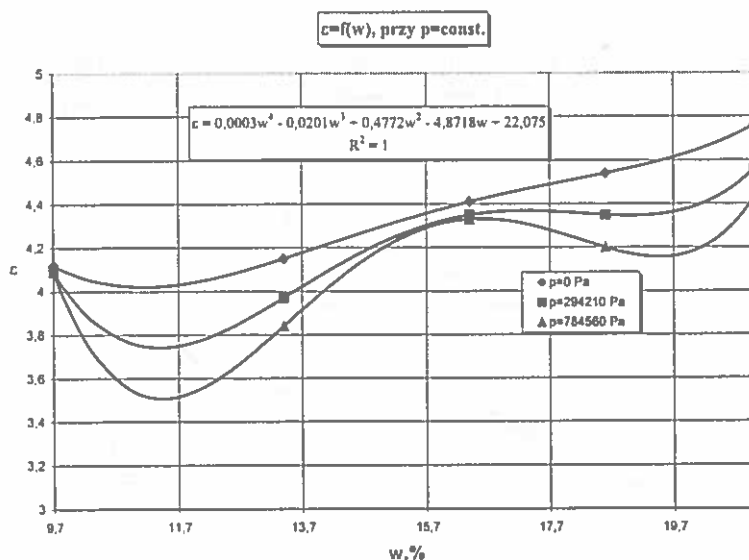
Wykresy podane na Rys. 97, 98, 99 przedstawiają zależność przenikalności elektrycznej odpowiednio jęczmienia, pszenicy i żyta w funkcji wilgotności ziarniaków przy stałym ciśnieniu.



Rys. 97. Zależność przenikalności elektrycznej jęczmienia od wilgotności przy:  $P = \text{const.}$  i  $T = 293 \text{ K}$ .  
 Fig. 97. The dependence of dielectric constant on moisture content at  $P = \text{const.}$  and  $T = 293 \text{ K}$  for barley.



Rys. 98. Zależność przenikalności elektrycznej pszenicy od wilgotności przy:  $P = \text{const.}$  i  $T = 293 \text{ K}$ .  
 Fig. 98. The dependence of dielectric constant on moisture content at  $P = \text{const.}$  and  $T = 293 \text{ K}$  for wheat.



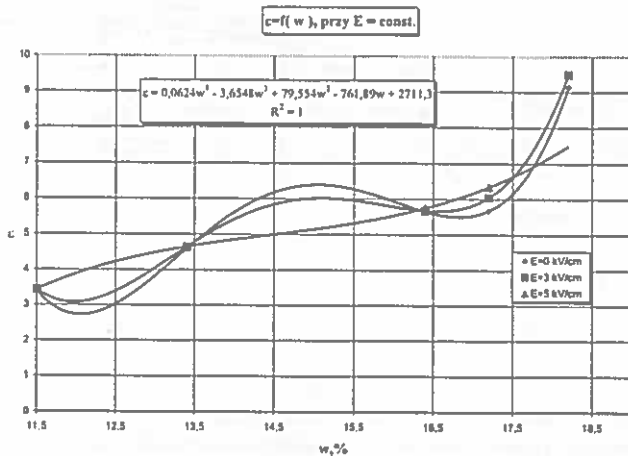
Rys. 99. Zależność przenikalności elektrycznej żyta od wilgotności przy:  $P = \text{const.}$  i  $T = 293$  K.  
Fig. 99. The dependence of dielectric constant on moisture content at  $P = \text{const.}$  and  $T = 293$  K for rye.

Na podstawie Rys. 97 ÷ 99 można stwierdzić wzrost przenikalności elektrycznej mieszaniny ziarniaki - powietrze przy wzroście wilgotności badanych ziarniaków. Wraz ze wzrostem ciśnienia zauważalne są większe zmiany przenikalności. Dla ziarniaków jęczmienia w przedziale wilgotności 14,5 ÷ 15,5 % występuje lokalne maksimum przenikalności elektrycznej przy stałych wartościach ciśnienia o wyższej wartości dla niższych ciśnień. Dla pszenicy lokalne maksima występują dla wilgotności z przedziałów: 10,9 ÷ 12,9 % i 18,9 ÷ 21 %, zaś dla żyta dla wilgotności w przedziale 15 ÷ 17 %. Lokalne minima przenikalności elektrycznej występują: dla jęczmienia dla wilgotności 11,5 %, dla pszenicy 16,4 %, zaś dla żyta 13,4 i 18.6 %.

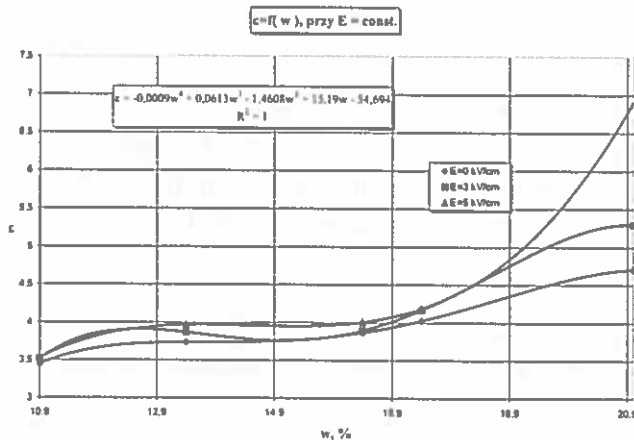
#### 8.4. Wpływ wilgotności na zmianę przenikalności elektrycznej mieszaniny ziarniaki - powietrze przy stałej wartości natężenia pola elektrostatycznego

W niniejszym rozdziale przedstawiono na wykresach przebiegi zależności przenikalności elektrycznej mieszaniny: ziarniaki - powietrze w funkcji wilgotności dla kilku wybranych wartości natężenia pola elektrostatycznego. Analiza tych wykresów pozwoli na zbadanie wpływu wilgotności ziarniaków na zmiany ich przenikalności elektrycznej pod działaniem naprężeń powstałych w wyniku

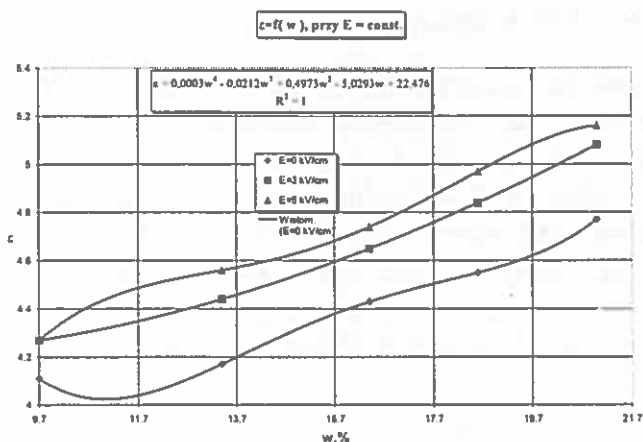
oddziaływania na ziarniak pola elektrycznego. Wykresy podane na Rys. 100-102 przedstawiają zależność przenikalności elektrycznej odpowiednio: jęczmienia, pszenicy i żyta, w funkcji wilgotności ziarniaków przy stałej wartości natężenia pola elektrostatycznego.



Rys. 100. Wpływ wilgotności ziarniaków jęczmienia na zmianę przenikalności elektrycznej mieszaniny: ziarniaki - powietrze przy stałych wartościach natężenia pola elektrostatycznego.  
 Fig. 100. The influence of grain moisture content on dielectric constant for the mixture of barley grain - air, at constant electrostatic field intensity.



Rys. 101. Wpływ wilgotności ziarniaków pszenicy na zmianę przenikalności elektrycznej mieszaniny: ziarniaki - powietrze przy stałych wartościach natężenia pola elektrostatycznego.  
 Fig. 101. The influence of grain moisture content on dielectric constant for the mixture of wheat grain - air, at constant electrostatic field intensity.



Rys. 102. Wpływ wilgotności ziarniaków żyta na zmianę przenikalności elektrycznej mieszaniny: ziarniaki - powietrze przy stałych wartościach natężenia pola elektrostatycznego.  
 Fig. 102. The influence of grain moisture content on dielectric constant for the mixture of rye grain - air, at constant electrostatic field intensity.

W oparciu o Rys. 100 ÷ 102 można stwierdzić wzrost przenikalności elektrycznej ziarniaków ze wzrostem ich wilgotności i natężenia pola elektrostatycznego. Wzrost ten można uzasadnić wysoką przenikalnością elektryczną wody oraz pojawieniem się prądu jonowego. W przypadku jęczmienia, minimum lokalne przenikalności występuje dla wilgotności 11,5 i 16,4 %, maksimum lokalne 13,4 %.

Dla pszenicy minimum lokalne przenikalności występuje dla wilgotności 10,9 i 21 %, maksimum lokalne 16,4 %, zaś dla żyta minimum lokalne przenikalności występuje dla wilgotności 9,7 %.

Przeprowadzone dotychczas badania nad obniżeniem energochłonności w procesie suszenia ziarniaków zbóż [8,106-108,117] sugerują, że dla różnych gatunków mogą istnieć różne natężenia pola elektrostatycznego, przy którym następuje obniżenie energochłonności.

Na efekt ten ma również wpływ wilgotność początkowa ziarniaków i temperatura suszenia.

## 9. SYNTETYCZNA OCENA UZYSKANYCH WYNIKÓW

Badania przenikalności elektrycznej ziarniaków zbóż zostały przeprowadzone w szerokim zakresie, uwzględniającym wpływ pola elektrycznego i naprężeń mechanicznych na przenikalność elektryczną trzech gatunków zbóż: jęczmienia, pszenicy i żyta. Zbadano wpływ wilgotności na zmianę przenikalności elektrycznej ziarniaków pod wpływem pola elektrycznego i naprężeń mechanicznych.

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

1. Wartość przenikalności elektrycznej ziarniaka zależy od naprężeń mechanicznych (Tabela 4÷9, Rys. 17÷31).
2. Wartość zmiany przenikalności elektrycznej ziarniaków zależy od ich wilgotności.
3. Przy wzroście ciśnienia przenikalność elektryczna ziarniaków maleje (tym silniej im większa była ich wilgotność). W Tabelach 10÷15 procentowa zmiana przenikalności elektrycznej ze znakiem (-) oznacza spadek przenikalności elektrycznej.
4. Przy ściskaniu ziarniaków otrzymano zmniejszenie średniej przenikalności elektrycznej: dla ziarniaków jęczmienia o wilgotności  $w\% = 16,4\%$ ,  $\Delta\epsilon = -8,6\%$ ; dla ziarniaków pszenicy o wilgotności  $w\% = 21\%$ ,  $\Delta\epsilon = -11,7\%$ ; dla ziarniaków żyta o wilgotności  $w\% = 13,4\%$ ;  $\Delta\epsilon = -7,5\%$ ;  $w\% = 18,6\%$ ;  $\Delta\epsilon = -7,5\%$ .
5. Zmiany te mają w przybliżeniu charakter hiperboliczny.

Badania laboratoryjne potwierdziły otrzymany drogą analityczną przez Barana [9] charakter zmian przenikalności elektrycznej ziarniaków poddanych działaniu naprężeń mechanicznych.

Na podstawie wyników badań przenikalności elektrycznej ziarniaków poddanych działaniu pola elektrostatycznego można stwierdzić, że:

1. Wartość przenikalności elektrycznej ziarniaka zależy od natężenia pola elektrostatycznego.
2. Wpływ pola elektrostatycznego jest większy dla ziarniaków o większej wilgotności ( $w\% > 16\%$ ).
3. Przy wzroście natężenia pola elektrostatycznego w granicach  $0 \div 500 \text{ kV m}^{-1}$  przenikalność elektryczna ziarniaków rośnie: dla jęczmienia uzyskano największy wzrost przenikalności  $\Delta\epsilon = +11,7\%$  dla ziarniaków o wilgotności  $w\% = 17,2\%$ ; dla pszenicy uzyskano największy wzrost  $\Delta\epsilon = +12,4\%$  dla ziarniaków o wilgotności  $w\% = 21\%$ ; dla żyta uzyskano  $\Delta\epsilon = +9,3\%$  dla ziarniaków o wilgotności  $w\% = 13,4\%$ .

Badanie przeprowadzono do  $500 \text{ kV m}^{-1}$ . Powyżej  $500 \text{ kV m}^{-1}$  następowało przebicie elektryczne w kondensatorze pomiarowym napelnionym ziarnem.

Wyniki przeprowadzonych badań (Rys. 17÷31), w których wzrostowi naprężeń ściskających odpowiadał spadek przenikalności elektrycznej, natomiast wzrostowi natężenia pola elektrostatycznego wzrost przenikalności ziarniaków (Rys. 54÷68) pozwalają przypuszczać, że pole elektrostatyczne wywołuje naprężenia rozciągające.

W silnych polach i przy dużych wilgotnościach dominującą rolę odgrywają efekty związane z przepływem prądu, co wymaga uwzględnienia przewodności ziarniaka [10].

Ziarniaki o dużych wilgotnościach tracą swoje elastyczne własności i stają się bardziej plastyczne [96].

Na podstawie wyników badań rezystancji ziarniaka poddanego działaniu sił rozciągających oraz ściskających stwierdzono (Rys. 50 i 51 oraz Tabeli 20 i 21):

1. Wartość rezystancji ziarniaka zależy od sił rozciągających.

W początkowej fazie rozciągania  $F=0\div 6 \text{ N}$  rezystancja nie zmienia swojej wartości.

Przy wyższych wartościach sił rozciągających  $F > 6 \text{ N}$  wartość rezystancji rośnie ze wzrostem siły (Tabela 20). Wzrost rezystancji ma w przybliżeniu przebieg hiperboliczny.

2. Maksymalny przyrost rezystancji odniesiony do wartości początkowej wynosi  $30\div 50 \%$ .

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

4. Największe zmiany obserwuje się w początkowej fazie ściskania: 60-cio procentowemu przyrostowi siły odpowiada 16-to procentowy przyrost rezystancji (Tabela 21).

5. W ostatniej fazie ściskania  $40 \text{ N} < F < 60 \text{ N}$  przyrost rezystancji ziarniaka jest niewielki i wynosi  $4 \%$ .

Na podstawie wyników badań rezystancji ziarniaka w funkcji natężenia pola elektrostatycznego stwierdzono (Rys. 76, Tabela 38), że:

1. Wartość rezystancji ziarniaka zależy od natężenia pola elektrostatycznego.

2. Wpływ pola elektrostatycznego jest większy dla ziarniaków o mniejszej wilgotności ( $w_{\%} 11,4 \%$ ).

3. Przy wzroście natężenia pola elektrostatycznego rezystancja ziarniaka zmniejsza się.

4. Zmiana rezystancji ma w przybliżeniu charakter liniowy; największa zmiana rezystancji przy wzroście natężenia od  $0$  do  $500 \text{ kV m}^{-1}$  wynosiła ok.  $5,5 \%$ .

## 10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone w powtarzalnych warunkach próby, potwierdzają istnienie zależności przenikalności elektrycznej ziarniaków od zewnętrznych sił mechanicznych i od pola elektrostatycznego (sił strykyjnych).

Uzyskane wyniki pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Analiza wyników badań potwierdziła zależność przenikalności elektrycznej ziarniaków od zewnętrznych sił mechanicznych i pola elektrostatycznego.
2. Naprężenia mechaniczne (typu ściskającego) powodują zmniejszenie przenikalności elektrycznej ziarniaków.
3. Pole elektrostatyczne powoduje wzrost przenikalności elektrycznej ziarniaków.
4. Zmiany przenikalności elektrycznej w funkcji naprężeń mechanicznych uwidaczniają się szczególnie przy wyższych wilgotnościach ziarniaków ( $w\% \geq 16\%$ ).
5. Ziarniaki wykazują zależność przenikalności elektrycznej od gęstości masy typu 1 i 2 (Tabela 19).

Wyniki badań przenikalności elektrycznej pozwalają przypuszczać, że pole elektrostatyczne wywołuje naprężenia elektrostrykcyjne typu rozciągającego. Celowe byłoby zbadanie wpływu naprężeń rozciągających na przenikalność elektryczną ziarniaków. Z uwagi na wymiary geometryczne obiektu badań oraz rodzaj naprężeń wymaga to opracowania odrębnych skomplikowanych metod pomiarowych.

Istnienie przedziałów, w których zmiany przenikalności elektrycznej wywołane naprężeniami mechanicznymi są silnie skorelowane ze zmianami wywołanymi polem elektrostatycznym pozwala przypuszczać, że na podstawie znajomości wpływu naprężeń mechanicznych na przenikalność elektryczną ziarniaków jest możliwe określenie charakteru sił wywołanych w nich polem elektrostatycznym.



## 11. 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. Acosta V., Cowan C.L., Graham B.J.: Podstawy fizyki współczesnej. PWN, Warszawa, 1981.
3. Akyel C., Bosisio R.G.: Wide-range dynamic complex dielectric constant measurements using microprocessor control techniques. IEEE Trans.Instr.Meas., IM-27, 4, 272-278, 1979.
4. Akyel Cevdet, Bosisio Renato G.: Reply to "Comments on /Permittivity measurements of granular food products suitable for computer simulations of microwave cooking processes/" IEEE Trans.Instr.Meas., 40, 6, 1048-1050, 1991.
5. Anderson L.S., Gajda G.B., Stuchly S.S.: Analysis of an open-ended coaxial line sensor in layered dielectrics. IEEE Trans.Instr.Meas., IM-35, 1, 13-18, 1986.
6. Anderson L., Stuchly S.S., Gajda G.B.: Paralleled-plate coaxial sensor for dielectric measurements-further analyses. IEEE Trans.Instr.Meas., IM-35, 1, 89-90, 1986.
7. Atiomeev V.I., Poliovskij J.U.: Ekspress-metod izmerenija otnositelnoj dielektriceskoj proniceemosti. Radiotekhnika, 3, 1986.
8. Baran J.: Influence of some material properties on electrostrictive effects within a dielectric model of grain. Proceed. of 11th Intern. Congress on Agricultural Eng. Dublin. 1989, 2205 - 2210.
9. Baran J.: Elektrostatyczne efekty strykcyjne w dielektrycznej sferoidzie o strukturze warstwowej. Praca doktorska. Politechnika Lubelska, 1990.
10. Basow A.M., Izakow F.A.: Elektrieskie swoistwa zerna i metody ich opredlenija. Elektrozernoocistitelnye masziny. Izdatel. Maszynostrojenie, Maskwa 1968.
11. Bei Cs., Wang Ya.: Study on the principle and equipment of dielectric separation of seed. Journal of Beijing Agricultural Engineering University. English Edition. 2: 1, 63-74, 2 ref., 1988.
12. Belyj V.N., Paskevic G.A.: Releevskie volny na powierzchni centrosimmetričnogo dielektrika vozmuszcennoj vnesnim periodiceskim elektriceskim polem. Radiotekhn. i Elektron., 1985. 1
13. Bose K.Tapan, Bottreau A.M., Chahine R.: Development of dipole probe for the study of dielectric properties of biological substances in radiofrequency and microwave region with time-domain reflectometry. IEEE Trans.Instr.Meas., IM-35, 1, 56-60, 1986.
14. Botanika. Praca zbiorowa pod red. Benona Polakowskiego. PWN, Warszawa, 1991.
15. Burek R., Piersiak-Żurawicz M., Polednik B.: Zastosowanie metody mikrofalowo-radiometrycznej do oznaczania wilgotności ziarna zbóż. PAK, 3, 61-62, 1986.
16. Bussey H.E., Morris D., Zal'tsman E.B.: International comparison of complex permittivity measurement at 9 GHz. IEEE Trans.Instr.Meas., IM-23, 3, 235-239, 1974.
17. Češka A.: Snímače objemové vlhkosti a objemového složení materiálů na netradičním principu. Zemědělska technika, Brézen 3/37, 1991.
18. Chelkowski A.: Fizyka dielektryków. PWN, Warszawa, 1993.
19. Clower R.E., Ross I. J., White G.M.: Properties of compressible granular materials as related to forces in bulk storage structure. Trans. ASAE, 72, 478-481, 1973.
20. Cutkosky R.D.: An automatic high-precision audiofrequency capacitance bridge. IEEE Trans.Instrument. a Measur., IM-34, 3, 383-389, 1985.
21. Dassn N.K., Voda S.M., Pozor D.M.: Two methods for the measurements of substrate dielectric constant. IEEE Trans.Mikrowave Theory Tech., MMT-35, 7, 636-642, 1987.
22. Dąbrowski S., Grochowicz J., Pietrzyk W.: Elektryczne właściwości nasion i ich praktyczne wykorzystanie. Problemy Agrofizyki 35, PAN Zakład Agrofizyki w Lublinie, Ossolineum, Wrocław 1981.
23. Galwas B.: Miernictwo mikrofalowe. WKL, Warszawa, 1986.

24. Halicz B.: Podstawy botaniki. wyd. 3 zmienione, PWN, Warszawa 1986.
25. Hanzelik F., Hlaváčová Z.: Prspevek k tdiu dielektrickch vlasnost zn jamea. Acta Technologica Agriculturac, 30, 79-86, 1990.
26. Hussler W.: Zastosowanie wykresu i - x w inżynierii sanitarnej. W - wa Arkady 1970.
27. Herman M., Kalestyński A., Widomski L.: Podstawy fizyki. PWN, Warszawa 1977.
28. Horyński M., Pietrzyk W.: Metoda pomiaru przenikalności dielektrycznej materiałów roślinnych. Referat III Międzynarodowa Konferencja Naukowa Problemy Techniki Rolniczej i Leśnej. SGGW Warszawa, 139-142, 1992.
29. Horyński M., Pietrzyk W., Ścibisz M.: The electric field influence on drying curves of grain seeds in a fluidal layer. 3rd Int. Research Conf. Rational Use of Local Energy Sources and Electrical Thermal Consumers in the Agriculture. Balatonfüred. Węgry, 57, 1993.
30. Horyński M., Pietrzyk W., Walusiak S.: Badanie zmian przenikalności elektrycznej ziarniaków zbóż w funkcji naprężeń mechanicznych. V Jubileuszowa Ogólnopolska Sesja Naukowa Oddziału Techniki Rolniczej. AR Szczecin, 253-254, 1993.
31. Horyński M., Pietrzyk W., Walusiak S.: Investigations of mechanical stress influence on grain dielectric permeability changes. 5th Int.Conf. on Physical Properties of Agricultural Materials. Bonn, Germany, Paper No.93-1216, September 6-8, 1993.
32. 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. Włochy, 1994.
33. Horyński M.: Application of Shmigiel's method to measure dielectric permeability of liquids. XXI C.I.G.R. World Congress and AgEng '94 Conference on Agricultural Engineering. Mediolan. Włochy, 1994.
34. Horyński M., Pietrzyk W., Ścibisz M.: Influence of electrostriction forces on energy consumption of a seed drying process in drum drier. XXI C.I.G.R. World Congress and AgEng '94 Conference on Agricultural Engineering. Mediolan, Włochy, 1994.
35. Horyński M., Pietrzyk W., Walusiak S., Sumorek A.: Badanie wpływu naprężeń mechanicznych na zmianę przenikalności dielektrycznej ziarniaków zbóż. 30-Lecie Wydziału Elektrycznego 1964-1994 (materiały historyczne i naukowe), Wydawnictwa Uczelniane, 147-152, 1994.
36. Horyński M., Pietrzyk W., Walusiak S.: Wpływ pola elektrycznego i naprężeń mechanicznych na przenikalność dielektryczną nasion zbóż. VII Międzynarodowa Sesja Naukowa Instytutu Techniki Rolniczej AR, Szczecin, 16-17 marzec 1995 Streszczenia prac, 76-77, 1995.
37. Horyński M., Pietrzyk W., Ścibisz M.: Wpływ pola elektrycznego na zużycie energii przy suszeniu ziarna w suszarce bębnowej, VII Międzynarodowa Sesja Naukowa Instytutu Techniki Rolniczej AR, Szczecin, 16-17 marzec 1995. Streszczenia prac, 74-75, 1995.
38. Horyński M., Pietrzyk W., Walusiak S.: Badanie przenikalności elektrycznej ziarniaków żyta w funkcji naprężeń mechanicznych. Konferencja Jubileuszowa Inżynieria Rolnicza - osiągnięcia i perspektywy. Akademia Rolnicza w Lublinie, Wydział Techniki Rolniczej, 7-9 czerwca 1995, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 424/425, 1995/1996.
39. Horyński M., Pietrzyk W., Walusiak S.: Dependence of barley dielectric permeability on moisture and mechanical stresses. Int. Conf. on Rational Use of Renewable Energy Sources in Agriculture in connection with the Environmental Control, Budapest, Hungary, 2-7 June, 1996.
40. Horyński M., Pietrzyk W., Walusiak S.: Influence of electric field and moisture on barley dielectric permeability. International Conference on Rational Use of Renewable Energy Sources in Agriculture in connection with the Environmental Control, Budapest, Hungary, 2-7 June, 1996.
41. Ingarden R. S., Jamiolkowski A.: Elektrodynamika klasyczna. PWN, Warszawa, 1980.

42. Iwan S.: Niektóre zagadnienia dotyczące pomiarów przenikalności i stratności dielektrycznej dielektryków ciekłych w paśmie częstotliwości radiowych metodami rezonansowymi. Zeszyty Naukowe W.S.Inż. w Zielonej Górze. Elektryka., 1974, 19, 3, 65-76.
43. Iwiński J., Żrudelny F.: Miernik do ciągłego pomiaru wilgotności papieru z oryginalnym układem pomiarowym małych zmian pojemności. PAK, 7, 7, 307-309, 1975.
44. Izakow F.J.A., Dmitriew W.I.: Rasczet zariada czastic w elektroseparatorie. Mech. i elektr. siel. choz-wa, 7, 40-41, 1975.
45. Jaworski B.M.: Elementy fizyki. T. 2, PWN, Warszawa, 1976.
46. Johnk Carl, T.A.: Engineering Electromagnetic Fields and Waves. John Wiley & Sons, 1975.
47. Kędryna Z.: Przetworniki wielkości nieelektrycznych przystosowane do systemów pomiarowych. Prace Naukowe Instytutu Metrologii Elektrycznej Polit. Wr., 13, 4, 51-67, 1977.
48. Kandała C.H.V.K., Nelson S.O., Lawrence K.C.: Non-destructive electrical measurement of moisture content in single kernels of corn. The Journal Agriculture Engng. Res., 44, 125-132, 1989.
49. Kasprzak B., Lesisz A., Madej P.: Automatyczny zestaw pomiarowy do badania dielektryków. Prace Naukowe Instytutu Metrologii Elektrycznej Polit. Wr., 14, 4, 165-172, 1977.
50. King Ray J., King Karl V., Woo K.: Microwave moisture measurement of grains. IEEE Trans.Instr.Meas., 41, 111-115, 1992.
51. Kittel C.: Wstęp do fizyki ciała stałego. PWN, Warszawa 1976.
52. Knipper N.V.: Use of high-frequency currents for grain drying. Nauch.Trud.Elektrif.Selkhoz., 2, 185, 1956.
53. Kołodziejcki A., Konkol R., Rudak Z., Skurjat T.: Mostek do pomiaru przenikalności elektrycznej. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej, 2, 21-26, 1979.
54. Kociński J.: Wstęp do fizyki współczesnej. PWN, Warszawa, 1977.
55. Krakowiak J., Pietrzyk W.: Utilization of strong electrostatic field in drying process. Proceed. of 7th International Symposium on High Voltage Engineering. Dresden., 37 - 38, 1991.
56. Kraszewski A.W., You T.S., Nelson S.O.: Microwave resonator technique for moisture content determination in single soybean seeds. IEEE Trans.Instr.Meas., 38, 1, 79-84, 1989.
57. Landau L., Lifszyc E.: Elektrodynamiczna ośrodków ciągłych. PWN, Warszawa, 1960.
58. Lawrence K.C., Nelson S.O., Kraszewski A.W.: Temperature-dependence of the dielectric properties of wheat. Transactions of the ASAE, 33, 5, 535-540, 1990.
59. Lykoudis P. S, Yu C.P.: The influence of electrostrictive forces in natural thermal convection. Int. J. Heat. Mass Transfer., 6, 853-862, 1963.
60. MALINOWSKI E.: Anatomia roślin. PWN, Warszawa, 1968.
61. Markowski E., Referowski L., Spichalski A.: Czujnik pojemnościowy do pomiaru wilgotności wiórów drewnianych. PAK, 1, 1, 6-9, 1969.
62. Mathur D.S.: Electrostatic measurements. Essentials of magnetism and electricity, 388-399, 1965.
63. Michajlenko A.A.: Povysenie točnosti izmiereniya dielektriczeskich parametrov v vysokocastotnych poljach. Izmerit. Tech., 1, 49-50, 1987.
64. Mohsenin N.N.: Electromagnetic radiation properties of foods and agricultural products. Gordon and Breach Science Publishers, 1984.
65. Muller-Gronau W., Wolff I.: A microwave method for the determination of the real parts of the magnetic and dielectric material parameters of premagnetized microwave ferrites. IEEE Trans.Instr.Meas., IM-32, 2, 377-381, 1983.
66. Naliwajew W.B.: Metod opredicleniya dielektriczeskich svojstw twierdych i zidkich dielektrikow. Metrologia, 1, 47-52, 1982.
67. Nelson S.O.: Microwave dielectric properties of grain and seed. Transactions of the ASAE, 72, 902-905, 1973.

68. Nelson S.O.: Review of factors influencing the dielectric properties of cereal grains. *Cereal Chem*, 58, 6, 487-492, 1981..
69. Nelson S.O.: Density dependence of the dielectric properties of particulate materials. *Transactions of the ASAE*, 82, 1823-1829, 1983.
70. Nelson S.O.: Mathematical models for the dielectric constants of spring barley and oats. *Transactions of the ASAE*, 29, 2, 607-610, 1986.
71. Nelson S.O.: Models for estimating the dielectric constant of winter barley. *International Agrophysics*, 2(3), 189-200, 1986.
72. Nelson S.O.: Frequency, moisture, and density dependence of the dielectric properties of small grains and soybeans. *Transactions of the ASAE*, 30, 2, 1538-1541, 1987.
73. Nelson S.O., Sokhansanj S.: Transient dielectric properties of wheat associated with nonequilibrium kernel moisture conditions. *Transactions of the ASAE*, 31, 4, 1251-1254, 1988.
74. Nelson S.O., Noh S.H.: Dielectric properties of rice at frequencies from 50 Hz to 12 GHz. *Transactions of the ASAE*, 32, 3, 991-998, 1989.
75. Nelson S.O., Kraszewski A.W.: Dielectric properties of materials and measurement techniques. *Drying technology*, 8, 5, 1123-1142, 1990.
76. Nelson S.O. i inni: Temperature-dependent model for the dielectric constant of soft red winter wheat. *Trans. ASAE*, 34, 5, 2091-2093, 1991.
77. Nelson S.O.: Comments on " Permittivity measurements of granular food products suitable for computer simulations of microwave cooking processes". *IEEE Trans.Instr.Meas.*, 40, 6, 1048-1050, 1991.
78. Nelson S.O.: Measurement and applications of dielectric properties of agricultural products. *IEEE Trans.Instr.Meas.*, 41, 1, 116-122, 1992.
79. Normy: PN-87/E-06570 Elektryczne przyrządy pomiarowe. Mostki prądu stałego do pomiaru rezystancji. Wymagania i badania. Normy, 1987.
80. Osvath P., Widmar S.: A high-voltage high-precision self-balancing capacitance and dissipation factor-measure bridge. *IEEE Trans.Instrument. & Measurement*, 1, 1986.
81. Pabis S.: Suszenie plodów rolnych. PWR i L, Warszawa, 1965.
82. Piech T.: Kilka uwag na temat metodyki pomiarów dielektrycznych parametrów ciał stałych. *Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej. Mat.Fiz.-Chem.*, 1, 39-44, 1969.
83. Pietrzyk W.: Uproszczone metody obliczania energii i momentu orientacji dla sferoidy o strukturze warstwowej w jednorodnym polu elektrostatycznym. *Archiwum Elektrotechniki*, 35, 2, 583-591, 1986.
84. Pietrzyk W.: Zachowanie się sferoidy wydłużonej w jednorodnym polu elektrostatycznym. *Archiwum Elektrotechniki*, 35, 2, 553-567, 1986.
85. Pietrzyk W.: Analiza rozkładu pola elektrycznego w dielektrycznej sferoidzie o strukturze warstwowej umieszczonej w jednorodnym polu elektrostatycznym. *Archiwum Elektrotechniki*, 35, 2, 591-597, 1986.
86. Pietrzyk W.: Dielektryczna sferoida wydłużona o strukturze warstwowej w jednorodnym polu elektrostatycznym. *Archiwum Elektrotechniki*, 35, 2, 567-583, 1986.
87. Powell S.D. i inni: Use of a density-independent function and microwave measurement system for grain moisture measurement. *Trans. ASAE*, 31, 6, 1875-1881, 1988.
88. Przegląd: Uniwersalna aparatura pomiarowa i analizująca na przykładzie firmy Bruela Kjeer. *Elektronizacja*, 6, 23-26, 1989.
89. Rawa H.: Elektryczność i magnetyzm w technice. PWN, Warszawa, 1994.
90. Ruszel P.: Kondensatory umożliwiające pomiar stałej dielektrycznej i stratności materiałów dielektrycznych stałych i ciekłych. *Prace Naukowe Instytutu Metrologii Elektrycznej, Politechnika, Wrocław*, 14, 5, 173-179, 1977.

91. 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. of ASME*, 144-148, 1972.
92. Sakiadis B.C.: Boudary-layer behavior on continuous solid surfaces: III. The boudary layer on a continuous cylindrical surface. *A.I.Ch.E. Journal*, 7, 3, 467-472, 1961.
93. Smith J.W.: Dielectric constant measurements. *Electric dipole moments*. 40-53, 1955.
94. Smith J.W.: Experimental methods in the determination of dipole moments through dielectric constant measurements. *Electric dipole moments*. 30-35, 1955.
95. Stasiuk W.P.: Wlijanie zazora na pogriesznost izmierienia dielektriczeskoi i magnitnoj pronicajemnosti mietodom koaksialnowo rezonatora. *Mietrologia*, 12, 46-51, 1982.
96. Staszczak Z.: Właściwości reologiczne ziarna pszenicy. Praca doktorska. Akademia Rolnicza, Lublin, 1978.
97. Szmigiel W.N., Jusubalijew A.: Issliedowanije wlijanija napriaziennosti pola na wnutriennuju oblast siemieni. *Mech. i elektr. siel. choz-wa*, 4, 45-47, 1984.
98. Tamm J.J.A.: Osnowy teorii elektricziestwa. Nauka, Moskwa, 1976.
99. Tarukin W.I.: Wozdiejstwije ponderomotomych sil na siemiena pri sieparacii. *Mech. i elektr. siel. choz-wa*, 12, 35-39, 1983.
100. Włodarski R.: Metoda wyznaczania zespolonej stałej dielektrycznej z pomiarów współczynnika transmisji w falowodzie. *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej. Fizyka*, XIV, 221, 111-121, 1974.
101. Wert Ch. A., Thomson R.M.: *Fizyka ciała stałego*. PWN, Warszawa, 1974.
102. Wierzbicki K., Semechezyn M., Lipiński A.: Właściwości dielektryczne nasion traw. *Acta Academiae Agriculturae ac Technicae Olstenensis*, 18, 55-68, 1988.
103. Wintle H.J., Kuryłowicz S.: Edge corrections for strip and disk capacitors. *IEEE Trans. Instr.Meas.*, IM-34, 1, 41-47, 1985.
104. Wolny A.: Wpływ pola elektrycznego na suszenie powierzchni cylindrycznej. *Materiały VII Symp. Suszarnictwa t.II. Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesowej. Politechnika Łódzka, Łódź*, 1991.
105. Zawijackas W.K.: Orientowanie siemian w elektrostatycznym pole. *Miech. i elektr. sielsk. choz-wa*, 39-40, 1984.

#### Prace nie publikowane

106. Horyński M., Krakowiak J., Pietrzyk W., Ścibisz M., Twardowski M.: Wykorzystanie sił elektrostrykcyjnych do obniżenia energochłonności procesu konwekcyjnego suszenia. Sprawozdanie nr 2, etap III, okres 1.03.1989 - 11.04.1990, CPBR 10.15, cel nr 12.21, IBMER, Lublin, kwiecień 1990.
107. Horyński M., Krakowiak J., Pietrzyk W., Ścibisz M., Twardowski M.: Wykorzystanie sił elektrostrykcyjnych do obniżania energochłonności procesu suszenia zbóż w suszarkach bębnowych. Sprawozdanie 3.
108. Horyński M., Krakowiak J., Pietrzyk W., Ścibisz M., Twardowski M.: Wykorzystanie sił elektrostrykcyjnych do obniżenia energochłonności procesu konwekcyjnego suszenia. Projekt badawczy R/07/044/90-2 realizowany na zlecenie KBN.
109. Horyński M., Pietrzyk W., Walusiak S. i inni: Badanie wpływu pola elektrycznego i naprężeń mechanicznych na właściwości elektryczne nasion. Projekt badawczy 5 0616 91 01 realizowany na zlecenie KBN. Sprawozdanie 1÷4.
110. Pakiet kalkulacyjny - Microsoft Excel 5.0.

## Ostatnio opublikowane prace autora

111. **Horyński M.:** Analysis of correlations between the influence of electrostatic field and the influence of pressure on grain electric permittivity. 6th Int. Conf. on Agrophysics, September 15-18, Lublin, Book of Abstracts, 1, 74-76, 1997.
112. **Horyński M.:** Wpływ pola elektrostatycznego na przenikalność elektryczną ziarniaków pszenicy. Polskie Towarzystwo Agrofizyczne. I Zjazd Naukowy. Referaty i doniesienia. Lublin, 57-59, 1997.
113. **Horyński M.:** Influence of moisture content on dielectric constant of heterogeneous dielectrics. Elmeco'97 Conference Proceedings, 201-204, 1997.
114. **Horyński M.:** Wpływ pola elektrostatycznego na przenikalność elektryczną dielektryka o strukturze niejednorodnej. Materiały III Konferencji Naukowo-Technicznej pod patronatem Sekcji Teorii Elektrotechniki PAN "Zastosowania komputerów w elektrotechnice", Poznań/Kiekrz, 20-22 kwietnia, 183-185, 1998.
115. **Horyński M.:** The image of electric field distribution in heterogeneous dielectrics. 3-rd International Conference on Physics of Agro and Food Products, Lublin 26-28.05.1998. Book of Abstracts, 1, 67, 1998.
116. **Boguta A., Horyński M., Pietrzyk W., Sumorek A.:** The influence of electric field on the kinetics of drying processes. AgEng Oslo 98, International Conference on Agricultural Engineering. Part I, 330-331.
117. **Sumorek A., Pietrzyk W., Boguta A., Horyński M.:** The influence of electric field and temperature on energy consumption in convective drying process. AgEng Oslo 98, International Conference on Agricultural Engineering. Part I, 431-432, 1998.
118. **Pietrzyk W., Grundas S., Horyński M., Sumorek A.:** Wykorzystanie pola elektrostatycznego i ozonu do obniżania energochłonności procesu suszenia ziarna zbóż. Acta Agrophysica PAN, Nr 16, monografia, 82, Lublin, 1998.
119. **Laboratorium z elektrotechniki. Opracowanie zbiorowe pod redakcją Wiktora Pietrzyka.** Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 264., 1998.
120. **Boguta A., Szwed G., Horyński M.:** Reflection factor changes in some seeds depending on their moisture. Proceedings of the International Conference "Trends in Agricultural Engineering". Praga, 20-24, 1999.
121. **Horyński M.:** The influence of electric field and mechanical stresses on the electric properties of the grain. Proceedings of the International Conference "Trends in Agricultural Engineering". Praga, 35-39, 1999.
122. **Walusiak S., Horyński M., Geodecki M.:** The influence of grain location in ear on its behaviour in electric field Proceedings of the International Conference "Trends in Agricultural Engineering". Praga, 655-659, 1999.
123. **Horyński M.:** Wpływ sferyczności cząstek dielektrycznych na przenikalność elektryczną mieszaniny dielektryk - powietrza. V Konferencja Naukowo-Techniczna pod patronatem Komitetu Elektrotechniki PAN "Zastosowania komputerów w elektrotechnice", Materiały Tom II, „Poznań/Kiekrz, 10-12 kwietnia 2000, 707- 709, 2000.
124. **Horyński M.:** Analysis of correlations between the influence of electrostatic field and of pressure on the dielectric permittivity of grain. Int. Agrophysics, 14, 1, 53-56, 2000.
125. **Horyński M., Wójcicka-Migasiuk D.:** Electric characteristics of dust applied to particulate control. 3rd International Conference "Electromagnetic devices and processes in environment protection.", Elmeco, Book of Abstracts., 60, 2000.

126. Horyński M., Pietrzyk W.: Forging development in the system of student's practical training in electrical engineering sector in the aspect of qualification needs. 3rd Int. Conf. "Electromagnetic devices and processes in environment protection.", Elmeco, Book of Abstracts., 61, 2000.
127. Horyński M., Pietrzyk W., Wójcicka-Migasiuk D.: Elektryczne charakterystyki pyłów oraz ich wykorzystanie do kontroli stężenia zapylenia. II Zjazd Naukowy Polskiego Towarzystwa Agrofizycznego. Referaty i doniesienia. 11-12.09.2000, 69.
128. Horyński M., Wójcicka-Migasiuk D., Pietrzyk W.: Forging development in the system of student's practical training in electrical engineering sector in the aspect of qualification needs. Jubileuszowa Międzynarodowa Konferencja Naukowa XXX lat Wydziału Techniki Rolniczej AR w Lublinie "Aktualne problemy inżynierii rolniczej w aspekcie integracji Polski z Unią Europejską", 13-14.09.2000, 58-59.
129. Pietrzyk W., Sumorek A., Horyński M., Ścibisz M., Walusiak S., Boguta A.: Testowanie uzwojenia bifilarnego w procesie filtracji pyłów organicznych. Jubileuszowa Międzynarodowa Konferencja Naukowa XXX lat Wydziału Techniki Rolniczej AR w Lublinie "Aktualne problemy inżynierii rolniczej w aspekcie integracji Polski z Unią Europejską", 13-14.09.2000, 288-289.
130. Wójcicka-Migasiuk D., Horyński M., Pietrzyk W.: Vocational training through student practice - Leonardo da Vinci project. Proceedings of the II. International Conference of Young Scientists 2000, 11-13.10.2000, Słowacja, 14-19.
131. Walusiak S., Horyński M.: The ecological aspects of fuel injection in selected car marks. Proceedings of the II. International Conference of Young Scientists 2000, 11-13.10.2000, Słowacja, 90-95.
132. Horyński M., Sumorek A., Ścibisz M., Pietrzyk W.: Applications of flat bifilar filters in removal of organic particles in agr – food industry. Proc. II. International Conference of Young Scientists 2000, 11-13.10.2000, Słowacja, 188-192.

## 12. STRESZCZENIE

### WPLYW POLA ELEKTROSTATYCZNEGO NA WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNE ZIARNA ZBÓŻ

W produkcji rolniczej od lat znaczące miejsce stanowią uprawy roślinne. Współczesne rolnictwo wymaga aby produkowane odmiany wydawały odpowiednio wysokie plony. Z faktem tym wiąże się zagadnienie racjonalnego zbioru plonów, właściwego ich zabezpieczenia przed szkodnikami, odpowiednich warunków przechowywania, a następnie przetwarzania. Istotny staje się tutaj problem poznania właściwości fizyko - chemicznych poszczególnych gatunków nasion, a obecnie w związku z coraz szerszym zastosowaniem energii elektrycznej w rolnictwie, ich właściwości elektrycznych. Wśród sposobów bezpośredniego wykorzystania tej energii można wyróżnić, np.: sortowanie i suszenie nasion, ochrona przed szkodnikami (dezynsekcja), przetwarzanie nasion poprzez grzanie mikrofalowe i w zakresie częstotliwości radiowych, pasteryzacja przetworów owocowych, dielektryczne suszenie drewna, elektrodowe ogrzewanie wody oraz elektrostatyczne odpylanie w młynach i mieszalniach materiałów pylistych i wiele innych.

W niniejszej pracy jest przedstawiona metoda określania, niektórych właściwości elektrycznych ziarniaków zbóż (przenikalność elektryczna i rezystancja) oraz wyniki pomiarów wpływu pola elektrycznego i naprężeń mechanicznych na te właściwości.

Wyniki tych badań i znajomość wzajemnych korelacji między wpływem pola elektrycznego i naprężeń mechanicznych na właściwości elektryczne materiałów pochodzenia biologicznego są ważne i przydatne dla grup inżynierów i projektantów urządzeń z branży przetwórstwa rolno-spożywczego. Szczególnie istotne jest to w regionie południowo-wschodnim Polski, który ma charakter rolniczo-przemysłowy i znajduje się tu wiele zakładów zajmujących się przetwórstwem płodów rolnych oraz indywidualnych użytkowników energii elektrycznej związanych z tym przemysłem i pragnących wykorzystać jej pozytywne oddziaływanie.

**S ł o w a   k l u c z o w e:** ziarno, stała dielektryczna, pole elektrostatyczne, ciśnienie, pomiary, naprężenia mechaniczne



### 13. SUMMARY

#### THE INFLUENCE OF ELECTROSTATIC FIELD ON THE ELECTRIC PROPERTIES OF THE GRAIN

Vegetable and corn crops have significant place in agricultural production for ages. Contemporary agriculture requires from produced varieties to provide relatively high yields. This task is related to problems of rational harvest, proper protection against pests, provision of good storage and then processing. That is why the problem of awareness of physical and chemical properties of particular seed species becomes more and more important. Presently, some particular attention should be paid to their electric properties because of wide applications of electric energy in developing and sustainable agriculture.

Among methods which directly use this energy some can be distinguished: sorting and drying of seeds, protection against pests (incl. disinsectization), microwave processing of grain and treatment by radio frequencies, processed fruit pasteurization, dielectrics seasoning of timber, electrode heating of water, electrostatic precipitation in mills and dust material mixing, etc.

This work presents a method to determine some electric properties of grain (dielectric constant, resistance) and test results of the influence of electric field and mechanical stress on these properties.

This research results and the awareness of mutual correlations between the influence of electric field and mechanical stress on electric properties of material of biological origin are important and useful for teams of engineers and designers of devices in agri-food industry. They contribute to create and develop new techniques in agri-food processing making use of the influence of electric field on materials of biological origin.

These problems are particularly important in the southern-eastern region of Poland, which is agricultural and industrial. Many companies dealing with agricultural crop processing, individual farms and individual electric energy users related to this industry can take the advantage of these results for positive and sustainable development of the region.

**K e y w o r d s:** grain, dielectric constant, electrostatic field, measurements, pressure

Adres autora:

Marck Horyński  
Politechnika Lubelska  
Wydział Elektryczny  
Katedra Elektrotechniki Ogólnej  
ul. Nadbystrzycka 38 A  
20-618 Lublin  
tel. 48 81 5381300, fax. 48 81 5381299  
e-mail: mhor@elektron.pol.lublin.pl