



POLITECHNIKA ŁÓDZKA

WYDZIAŁ TECHNOLOGII MATERIAŁOWYCH
I WZORNICTWA TEKSTYLÓW

Instytut Włókiennictwa

ROZPRAWA DOKTORSKA

***WPLÝW ZMIAN KLIMATYCZNYCH NA PARAMETRY
JAKOŚCIOWE I ZAWARTOŚĆ SUBSTANCJI
AKTYWNYCH WŁÓKNA LNU***

Edyta Kwiatkowska

Promotor:

dr hab. inż. Małgorzata Zimniewska, prof. IWNiRZ PIB

Łódź, 2024r.

Podziękowania

Składam serdeczne podziękowania Promotorom pracy

Pani dr hab. inż. Małgorzacie Zimniewskiej, prof. IWNIRZ PIB oraz
śp. Pani prof. dr hab. inż. Izabelli Krucińskiej za opiekę naukową, okazaną
życzliwość, inspirację, poświęcony czas oraz wszelką pomoc w trakcie
przygotowania pracy.

Mgr inż. Agacie Ponieckiej za wsparcie oraz okazaną pomoc podczas całego
okresu studiów doktoranckich.

Panu dr hab. Michałowi Puchalskiemu, prof. PŁ za pomoc w wykonaniu badań
w Pracowni Rentgenograficznej Instytutu Włókiennictwa Politechniki Łódzkiej.

Panu dr hab. Zbigniewowi Kaczmarkowi, prof. UPP za pomoc w wykonaniu
badań w Katedrze Gleboznawstwa i Ochrony Gruntów Uniwersytetu
Przyrodniczego w Poznaniu.

**Współpracownikom z Instytutu Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich
Państwowego Instytutu Badawczego** za życzliwą pomoc oraz cenne rady
w trakcie prowadzenia badań.

Osobne podziękowania składam **mężowi, córce oraz rodzicom** za
wyrozumiałość, cierpliwość i ogromne wsparcie, które dodawało mi sił.

Autorka

STRESZCZENIE PRACY

Rozprawa doktorska podejmuje problematykę zależności parametrów jakościowych włókien lnianych z przeznaczeniem na wyroby odzieżowe, które mogłyby mieć korzystny wpływ na skórę człowieka ze względu na zawartość substancji aktywnych, od warunków klimatycznych panujących w okresie wegetacji lnu, w szczególności ekstremalnych warunków pogodowych powodujących występowanie zjawiska suszy. Celem rozprawy doktorskiej było rozwiązanie problemu naukowego jakim jest zidentyfikowanie i zdeterminowanie wpływu stresu suszy występującego w okresie wzrostu rośliny na jakość oraz aktywność antyoksydacyjną włókna lnu. Badania kluczowe dla osiągnięcia celu pracy obejmowały eksplorację różnic parametrów jakościowych włókien w zależności od poziomu wilgotności gleby, w której len był uprawiany oraz odmiany lnu, jak również badanie chemicznej budowy włókna pod kątem zawartości kwasów fenolowych, oraz struktury krystalicznej włókien.

Interdyscyplinarność pracy łączy wiedzę oraz metody właściwe dla inżynierii materiałowej oraz nauk rolniczych, które umożliwiły zbadanie wpływu czynników zewnętrznych podczas wzrostu rośliny na włókno, ściśle określając pochodzenie naturalnego materiału badawczego. Przed powstaniem pracy, nie prowadzono badań, których celem była analiza zawartości kwasów fenolowych we włóknie lnu w zależności od stresu suszy podczas wzrostu roślin. Empiryczny charakter rozprawy doktorskiej polegał na zaplanowaniu oraz przeprowadzeniu trzyletniego doświadczenia wazonowego w hali wegetacyjnej, które umożliwiło pozyskanie włókna jako materiału badawczego do dalszej analizy w celu weryfikacji hipotez oraz zrozumienia mechanizmu jak deficyt wody w podłożu podczas wzrostu lnu wpływa na jakość włókna. Praca wymagała starannie zaprojektowanego eksperymentu w celu identyfikacji zmiennych zależnych, jakimi są parametry jakościowe i zawartość kwasów fenolowych we włóknie i zmiennych niezależnych, do których zaliczono odmianę lnu oraz zadany poziom wilgoci w glebie. Ponadto, analizowano czynniki, które mogły wpłynąć na parametry materiału badawczego, takie jak: temperatura powietrza oraz ilość opadów podczas rośnięcia słomy lnianej.

Rozdział pierwszy został poświęcony analizie dostępnej literatury, w celu przybliżenia i wyjaśnienia dotychczasowej wiedzy teoretycznej, dotyczącej

podjętych w pracy zagadnień. Rozdział obejmuje zagadnienia związane z charakterystyką gatunku lnu dostarczającego włókno tekstylne, oraz aspekty odporności roślin na suszę. Zaprezentowane dane literaturowe zostały wykorzystane do planowania doświadczenia. Następnie omówiono cechy charakterystyczne włókien lnianych wraz z opisem ich składu chemicznego oraz właściwościami prozdrowotnymi.

Rozdział drugi przedstawia cel badań oraz hipotezy rozprawy doktorskiej.

Rozdział trzeci zawiera opis części doświadczalnej pracy, w szczegółowy sposób prezentuje prowadzony eksperyment wraz z charakterystyką wytypowanych w niniejszej pracy odmian lnu włóknistego (Artemida, Modran, Sara) oraz metodyką badań na podstawie norm lub procedur.

Rozdział czwarty zawiera analizę wyników badań, która pozwoliła na przeprowadzenie weryfikacji szczegółowych hipotez oraz głównej hipotezy niniejszej pracy. Susza podczas wzrostu roślin lnianych ma istotny wpływ zarówno na jakość włókien, jak i na zawartość substancji aktywnych. Jest to szczególnie istotne, biorąc pod uwagę złożoność natury oraz trudność w przewidywaniu reakcji roślin na zmiany warunków pogodowych.

W rozdziale piątym i szóstym podsumowano wyniki prowadzonych w ramach rozprawy badań i sformułowano adekwatne wnioski. Wyniki badań potwierdziły słuszność hipotezy głównej mówiącej, że deficyt wody w glebie podczas okresu wzrostu lnu wpływa na jakość włókien lnianych oraz na zawartość substancji aktywnych we włóknie.

W rozdziale siódmym przedstawiono bibliografię źródeł wykorzystanych do przygotowania rozprawy doktorskiej. Następnie zamieszczono spis tabel, ilustracji oraz załącznik w którym zaprezentowano obrazy mikroskopowe przekrojów poprzecznych i widoków wzdłużnych włókien.

Rozprawa doktorska pozwoliła na opisanie nowych spostrzeżeń w zakresie właściwości włókien lnianych poprzez identyfikację i zbadanie wpływu stresu suszy występującego podczas wzrostu roślin na parametry jakościowe i bioaktywność naturalnych włókien tekstylnych.

ABSTRACT

The doctoral thesis addresses the issue of the dependence of quality parameters of flax fibers intended for clothing products, which could have a beneficial effect on human skin due to the content of active substances, on the climatic conditions prevailing during the flax vegetation period, especially extreme weather conditions causing drought. The aim of the doctoral thesis was to solve the scientific problem of identifying and determining the influence of drought stress occurring during plant growth on the quality and antioxidant activity of flax fiber. Key research to achieve the aim of the thesis included exploring differences in quality parameters of fibers depending on the soil moisture level in which flax was cultivated and flax variety, as well as studying the chemical structure of the fiber in terms of phenolic acid content and fiber crystalline structure.

The interdisciplinary nature of the work combines knowledge and methods appropriate for materials engineering and agricultural sciences, which allowed for the examination of the influence of external factors during plant growth on fiber, precisely defining the origin of the natural research material. Prior to this work, no research had been conducted to analyze the content of phenolic acids in flax fiber depending on drought stress during plant growth. The empirical nature of the doctoral thesis involved planning and conducting a three-year pot experiment in a plant growth facility, which enabled the acquisition of fiber as a research material for further analysis to verify hypotheses and understand the mechanism of how water deficit in the substrate during flax growth affects fiber quality. The work required a carefully designed experiment to identify dependent variables, such as quality parameters and phenolic acid content in the fiber, and independent variables, including flax variety and the assigned soil moisture level. Additionally, factors that could influence the parameters of the research material, such as air temperature and precipitation during flax straw retting, were analyzed.

The first chapter was devoted to the analysis of available literature to approximate and explain the existing theoretical knowledge regarding the issues addressed in the work. The chapter includes issues related to the characteristics of the flax species providing textile fiber and aspects of plant resistance to drought. The presented literature data were used to plan the experiment. Next, the

characteristic features of flax fibers were discussed along with a description of their chemical composition and health properties.

The second chapter presents the research objectives and hypotheses of the doctoral thesis.

The third chapter contains a description of the experimental part of the work, presenting in detail the conducted experiment along with the characterization of the selected fiber flax varieties (Artemida, Modran, Sara) and the research methodology based on standards or procedures.

The fourth chapter contains the analysis of the research results, which allowed for the verification of specific hypotheses and the main hypothesis of this work. Drought during the growth of flax plants significantly influences both the quality of fibers and the content of active substances. This is particularly important considering the complexity of nature and the difficulty in predicting plant reactions to weather changes.

The fifth and sixth chapters summarize the results of the conducted research within the thesis and formulate appropriate conclusions. The research results confirmed the validity of the main hypothesis stating that water deficit in the soil during the flax growth period affects the quality of flax fibers and the content of active substances in the fiber.

The seventh chapter presents the bibliography of sources used in the preparation of the doctoral thesis. Then, a list of tables, illustrations, and an appendix containing microscopic images of cross-sections and longitudinal views of fibers are included.

The doctoral thesis allowed for describing new insights into the properties of flax fibers by identifying and examining the influence of drought stress occurring during plant growth on the quality parameters and bioactivity of natural textile fibers.

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE PRACY	5
ABSTRACT	7
SPIS TREŚCI.....	9
WYKAZ SKRÓTÓW I SYMBOLI	13
WSTĘP	17
1. WPROWADZENIE LITERATUROWE	20
1.1. Charakterystyka gatunku lnu.....	21
1.1.1. Charakterystyka morfologiczna lnu.....	24
1.1.2. Produkcja lnu oraz znaczenie gospodarcze	25
1.1.3. Fazy rozwojowe lnu	28
1.1.4. Organizacja wewnętrzna tkanek biologicznych lnu.....	33
1.1.5. Wzrost komórek włókien lnianych.....	34
1.1.6. Wzrost grubości ściany komórkowej lnu	36
1.1.7. Skład i organizacja ściany komórkowej włókien lnianych	37
1.1.8. Dobór odmian lnu	38
1.1.9. Odporność lnu zwyczajnego na suszę	42
1.2. Ogólne zasady agrotechniki w uprawie lnu	44
1.2.1. Wymagania klimatyczne.....	44
1.2.2. Wymagania glebowe	44
1.2.3. Siew.....	45
1.2.4. Zintegrowany system nawożenia.....	46
1.2.5. Zbiór	47
1.3. Metody pozyskania włókien ze słomy lnu.....	49
1.3.1. Przerób mechaniczny włókien lnianych	49
1.3.2. Metody biologiczne pozyskania włókien lnianych	50
1.3.3. Odklejanie chemiczne włókien lnianych	52
1.3.4. Odklejanie enzymatyczne włókien lnianych.....	52
1.3.5. Metody fizyczne pozyskania włókien lnianych	53
1.4. Charakterystyka włókien lnianych.....	55
1.4.1. Skład chemiczny włókien lnianych	57
1.5. Właściwości prozdrowotne włókien lnianych	60

1.5.1. Aktywność biologiczna włókien lnianych.....	60
1.5.2. Charakterystyka wybranych kwasów fenolowych	64
1.5.2.1. Kwas ferulowy	64
1.5.2.2. Kwas <i>p</i> -kumarowy	65
1.5.2.3. Kwas syringowy	66
1.5.2.4. Kwas synapinowy	67
2. CEL PRACY	68
3. CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA	69
3.1. Warunki prowadzenia eksperymentu.....	69
3.2. Charakterystyka materiału badawczego	75
3.2.1. Odmiana Artemida	75
3.2.2. Odmiana Modran	76
3.2.3. Odmiana Sara	76
3.3. Metodyka badań	77
3.3.1. Analiza jakościowa gleby	77
3.3.2. Badania wydajności włókna długiego	78
3.3.3. Badania długości średniej wagowej włókna	79
3.3.4. Badania masy liniowej włókna.....	79
3.3.5. Badania wskaźników przy rozciąganiu statycznym włókien lnu	80
3.3.6. Badania mikroskopowe włókien lnu	80
3.3.7. Badania wilgotności włókna	81
3.3.8. Oznaczenie zawartości substancji woskowych i tłuszczowych we włóknach lnianych.....	81
3.3.9. Oznaczenie zawartości lignin we włóknach lnianych	82
3.3.10. Spektroskopia w podczerwieni FTIR-ATR włókien lnianych.....	83
3.3.11. Zawartość kwasów fenolowych we włóknach lnianych	83
3.3.12. Aktywność antyoksydacyjna włókien lnianych.....	84
3.3.12.1. Ocena zdolności włókien lnianych do redukcji jonów żelaza oznaczona metodą FRAP	85
3.3.12.2. Metoda oceny właściwości antyoksydacyjnych włókien lnianych z wykorzystaniem rodnika DPPH.....	86
3.3.13. Szerokokątowa dyfraktometria rentgenowska włókien lnianych.....	87
4. WYNIKI I DYSKUSJA	88

4.1.	Wyniki analizy jakościowej gleby	88
4.2.	Ocena wydajności oraz jakości włókien lnu	92
4.2.1.	Wyniki badań wydajności włókien lnu	92
4.2.2.	Wyniki badań średniej długości wagowej włókna	93
4.2.3.	Wyniki badań masy liniowej włókna	94
4.2.4.	Wyniki badań wskaźników przy rozciąganiu statycznym włókien	99
4.2.5.	Analiza mikroskopowa SEM włókien	106
4.2.6.	Podsumowanie	107
4.3.	Analiza chemiczna włókien lnu	109
4.3.1.	Wyniki badań wilgotności włókien lnianych	109
4.3.2.	Wyniki badań zawartości substancji woskowych i tłuszczowych we włóknach lnianych	111
4.3.3.	Wyniki badań zawartości lignin we włóknach lnianych	115
4.3.4.	Analiza spektroskopii w podczerwieni FTIR-ATR włókien lnianych	120
4.3.5.	Podsumowanie	124
4.4.	Analiza aktywności biologicznej włókien lnu	126
4.4.1.	Zawartość kwasów fenolowych we włóknach lnianych	126
4.4.1.1.	Analiza wariacji czynników na zawartość kwasu <i>p</i> -kumarowego we włóknach lnianych	132
4.4.2.	Aktywność antyoksydacyjna włókien lnianych	138
4.4.2.1.	Potencjał redukcyjny włókien lnu oznaczony metodą FRAP ...	138
4.4.2.2.	Analiza potencjału antyoksydacyjnego włókien lnianych z wykorzystaniem rodnika DPPH	147
4.4.2.3.	Analiza korelacji zawartości lignin i kwasów fenolowych we włóknach lnianych	156
4.4.3.	Podsumowanie	157
4.5.	Szerokokątowa dyfraktometria rentgenowska włókien lnianych	159
4.6.	Ocena cech włókna badanych odmian lnu	163
5.	PODSUMOWANIE	167
6.	WNIOSKI	174
7.	BIBLIOGRAFIA	177
	SPIS TABEL	193
	SPIS ILUSTRACJI	197
	Załącznik 1	203

WYKAZ SKRÓTÓW I SYMBOLI

2θ	kąt odbłyску – kąt pomiędzy wiązką wtórną i pierwotną promieniowania rentgenowskiego, równy kątowi pomiędzy źródłem promieniowania i detektorem
η^2	wskaźnik siły efektu
λ	długość fali
χ_c	stopień krystaliczności
A25	włókno Iniane odmiany Artemida; wilgotność gleby podczas wzrostu roślin na poziomie 25% PPW
A35	włókno Iniane odmiany Artemida; wilgotność gleby podczas wzrostu roślin na poziomie 23% PPW
A45	włókno Iniane odmiany Artemida; wilgotność gleby podczas wzrostu roślin na poziomie 45% PPW
AFM	<i>ang. Atomic Force Microscope</i> – mikroskop sił atomowych
ATR	<i>ang. Attenuated Total Reflection</i> – spektroskopia osłabionego całkowitego odbicia w podczerwieni
BBCH	<i>niem. Biologische Bundesanstalt Bundessortenamt und Chemische Industrie</i>
BZT _n	Biochemiczne zapotrzebowanie tlenu
ChZT	Chemiczne zapotrzebowanie tlenu
COBORU	Centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin Uprawnych
d	średnica
DNA	<i>ang. deoxyribonucleic acid</i> – kwas deoksyrybonukleinowy
DPPH	2,2-difenylo-1-pikrylohydrazyl
F	średnia wariancji wewnątrz grupy

FAOSTAT	<i>ang. Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database</i> - Korporacyjna Baza Danych Statystycznych Organizacji ds. Wyżywienia i Rolnictwa
fot.	fotografia
FRAP	<i>ang. Ferric Reducing Antioxidant Power</i> - metoda oznaczania zdolności redukowania jonów Fe(III)
FTIR	<i>ang. Fourier Transform Infrared</i> – fourierowska spektroskopia w podczerwieni
HPLC/DAD	<i>ang. High-Performance Liquid Chromatography with Diode-Array Detection</i> – wysokosprawną chromatografię cieczową z detekcją diodową
IC ₅₀	<i>ang. inhibition concentration</i> – stężenie przeciwutleniacza redukujące w 50% wolne rodniki
IMGW PIB	Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowy Instytut Badawczy
in.	inni
IR	<i>ang. infrared</i> – promieniowanie podczerwone
IWNIRZ PIB	Instytut Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich Państwowy Instytut Badawczy
K α	długości fali promieniowania rentgenowskiego
KR	Krajowy Rejestr
M	średnia arytmetyczna
M25	włókno Iniane odmiany Modran; wilgotność gleby podczas wzrostu roślin na poziomie 25% PPW
M35	włókno Iniane odmiany Modran; wilgotność gleby podczas wzrostu roślin na poziomie 35% PPW

M45	włókno Iniane odmiany Modran; wilgotność gleby podczas wzrostu roślin na poziomie 45% PPW
<i>N</i>	liczność próby
<i>p</i>	prawdopodobieństwo statystyki testu
PPW	polowa pojemność wodna
PTG	Polskie Towarzystwo Gleboznawcze
<i>r</i>	współczynnik korelacji
R^2	kwadrat współczynnika korelacji
S25	włókno Iniane odmiany Sara; wilgotność gleby podczas wzrostu roślin na poziomie 25% PPW
S35	włókno Iniane odmiany Sara; wilgotność gleby podczas wzrostu roślin na poziomie 35% PPW
S45	włókno Iniane odmiany Sara; wilgotność gleby podczas wzrostu roślin na poziomie 45% PPW
<i>SD</i>	<i>ang. Standard Deviation</i> – odchylenie standardowe
SEM	<i>ang. Scanning Electron Microscope</i> – Skaningowy Mikroskop Elektronowy
TPTZ	2,4,6-tris(2-pirydylo)-1,3,5-triazyn
USDA	<i>ang. United States Department of Agriculture</i> – Departament Rolnictwa Stanów Zjednoczonych
UV	<i>ang. ultraviolet</i> – promieniowanie ultrafioletowe
UV-VIS	<i>ang. UV-visible spectrophotometry</i> – rodzaj spektroskopii świetlnej, w którym wykorzystuje się promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie światła (długość fali 200–1100 nm)
WAXD	<i>ang. wide-angle X-ray diffraction</i> – szerokokątowa dyfraktometria rentgenowska

WSTĘP

Wzrost średniej temperatury powietrza, który w ostatnich dziesięcioleciach ma miejsce na całym świecie jest następstwem zmian klimatycznych, którego skutki wpływają na różne obszary życia człowieka i środowiska naturalnego. Występujące susze oraz wzrost popularności wyrobów wykonanych z włókien lnianych były inspiracją do podjęcia badań w celu sprawdzenia, czy warunki pogodowe podczas uprawy lnu wpływają na jakość włókien, które następnie mogą być wykorzystane w przemyśle włókienniczym. Len jest trzecim co do wielkości naturalnym źródłem dostarczającym włókno tekstylne oraz jedną z pięciu znaczących roślin oleistych na świecie (Mishra i Awasthi 2021). Włókna lnu ze względu na ich pozytywny prośrodowiskowy charakter są alternatywą dla włókien syntetycznych, których recykling jest ograniczony, w związku z tym generują niebiodegradowalne odpady. Rosnąca świadomość społeczna dotycząca z jednej strony konieczności dbania o środowisko oraz z drugiej strony komfortu jaki mogą zapewniać ubrania sprawiła, że odzież lniana znów stała się popularna, modna oraz dostępna, z łatwością można spotkać ją w sklepach w przystępnych cenach. Ze względu na szereg zalet, len zasługuje na uwagę jako materiał tekstylny. Dlatego istotnym jest, aby zbadać wpływ zmian klimatycznych w szczególności stresu suszy na jakość tego cennego materiału włókienniczego. Dodatkowo praca przyczyni się do popularyzacji wiedzy na temat prozdrowotnych właściwości lnu oraz zawartości substancji aktywnych we włóknach lnianych w postaci kwasów fenolowych, które w korzystny sposób mogą wpływać na skórę człowieka. Dokonane odkrycia w tym zakresie nie są powszechnie znane, dlatego zazwyczaj nie są uwzględniane w prezentacjach właściwości wyrobów lnianych.

Celem pracy było określenie jak stres suszy, któremu poddane były rośliny lnu w okresie wegetacji wpływa na wydajność, długość, masę liniową, wskaźniki przy rozciąganiu statycznym, strukturę zewnętrzną, wewnętrzną, skład chemiczny, budowę krystaliczną włókien oraz zawartość substancji aktywnych, na podstawie analizy porównawczej prowadzonej dla wytypowanych odmian lnu włóknistego: Artemida, Modran oraz Sara, wzrastających w warunkach różnej wilgotności gleby: 25%, 35% oraz 45% polowej pojemności wodnej.

Problematyka podjętych badań naukowych w interdyscyplinarny sposób połączyła wiedzę oraz metody właściwe dla dyscyplin: inżynieria materiałowa oraz rolnictwo i ogrodnictwo. W przypadku materiału tekstylnego jakim są włókna naturalne, za proces formowania włókna i kształtowania jego właściwości odpowiedzialna jest roślina oraz warunki jej wzrostu. W związku z tym, istotnym jest prowadzenie rozważań w zakresie właściwości włókna w odniesieniu do warunków upraw lnu. Z tego powodu, w części pracy można znaleźć informacje dotyczące warunków agrotechnicznych niezbędnych do opracowania metodyki i planu doświadczenia, którego celem było pozyskanie materiału badawczego w postaci włókna lnu. Warunki agrotechniczne uprawy lnu nie są ściśle związane z inżynierią materiałową, ale wpływają na parametry włókna - materiału badawczego, na którym pracowano w następnych etapach pracy. Integracja wiedzy pozwoliła w nowy sposób spojrzeć na problem jakości włókna lnu oraz podjęcie próby wyjaśnienia zjawisk, które nie byłyby możliwe w jednej dziedzinie nauki. Interdyscyplinarne badania umożliwiły identyfikację oraz analizę czynników, które wpływały na rozwój włókna w roślinie w obliczu zmieniającego się klimatu. Ponadto, dają możliwość na efektywne wykorzystanie wyników badań, wiedzy i umiejętności oraz współpracę między naukowcami reprezentującymi odrębne dziedziny nauki.

Podjęte badania dotyczące wpływu suszy na rozwój i właściwości materiału tekstylnego jakim jest włókno lniane w roślinie przyczynią się do poszerzenia aktualnej wiedzy z zakresu inżynierii materiałowej zarówno z perspektywy naukowej jak i praktycznej. Przemysł włókienniczy musi się zmierzyć ze skutkami zmian klimatu i ich wpływem na jakość surowca w tym przypadku włókien naturalnych. Wyniki badań pozwolą odpowiedzieć na pytanie, czy stres suszy spowoduje pogorszenie jakości surowca – włókna lnu i jaki to może mieć wpływ na długofalowe planowanie kierunków wykorzystania włókna łykowego. Z drugiej strony, skrupulatny i świadomy wybór odmian lnu na etapie planowania uprawy w warunkach suszy w zależności od przeznaczenia włókna będzie miał wpływ na jakość włókien dostarczanych dla przemysłu włókienniczego i może zapewnić wymagane parametry wyrobów gotowych. Wyniki pracy poszerzają wiedzę w zakresie zawartości kwasów fenolowych we włóknach pochodzących z różnych odmian lnu uprawianych w różnych warunkach wilgotności gleby. Uprawa lnu oraz

wszechstronne wykorzystanie włókien lnianych w przemyśle tekstylnym przyczynia się do zrównoważonego rozwoju sektora włókien naturalnych i przemysłu włókienniczego.

1. WPROWADZENIE LITERATUROWE

Len (*Linum* L.) jest jedną z najstarszych roślin uprawianych przez człowieka, której początki wykorzystania sięgają ok. 8000 r. p.n.e. na obszarze Żyznego Półksiężyca. (Melelli i in. 2021). Dzięki dogodnym warunkom na pasie ziemi ciągnącym się od Egiptu poprzez Palestynę, Syrię po Mezopotamię, powstały pierwsze obszary rolnicze. Badania dowodzą, że len w pierwszej kolejności był uprawiany w celach oleistych, a następnie włóknistych (Allaby i in. 2005). Kvavadze i in. opisują unikalne znalezisko dzikich włókien *Linianych*, świadczące o wykorzystaniu tego surowca 30000 lat temu (Kvavadze i in. 2009). Istnieje teoria, że udomowienie dziko rosnącego *Linu* prawdopodobnie nastąpiło w Mezopotamii (Hyams 1974), powszechnie uznaje się starożytny Egipt za kolebkę jednej z najstarszych cywilizacji świata, który zainicjował uprawę *Linu* w celach tekstylnych (Melelli i in. 2021). Freski w grobowcach z lat 2400–2200 p.n.e. dokumentują uprawę, ręczne wrywanie roślin oraz całą technologię przerobu słomy *Linianej* (Zajac i in. 2011). Zachowane fragmenty pierwszych egipskich tkanin pochodzą z czasów neolitu, których pochodzenie datuje się na 5000 r. p.n.e. (Cybulska i Maik 2007). Liczne badania potwierdzają wykorzystanie tkanin *Linianych* w Egipcie, które były wykonywane na prymitywnych krosnach. Len był szeroko rozpowszechniony wśród kapłanów oraz wysokich rangą urzędników, których odzież była wykonywana z białego, *Linianego* płótna. Znalazł zastosowanie również w rybołówstwie oraz przy wytwarzaniu żagli. Tkanin *Linianych* używano również do owijania mumii w formie wielometrowego bandażu, tkanego na potrzeby danego pochówku. Optymalne warunki klimatyczne panujące w grobowcach oraz brak ekspozycji na promieniowanie UV pozwoliły zachować wyroby w dobrym stanie do współczesności (Melelli i in. 2021).

Len stale jest poszukiwany na rynku ze względu na szerokie spektrum zastosowań w różnych branżach. *Nasiona Linu* zawierają ok. 41% oleju, który jest bogaty w nienasycone kwasy tłuszczowe omega 3 i omega 6 (Nofal i in. 2011). Potencjał przemysłowy włókien *Linianych* pozwala na szerokie wykorzystanie surowca. Włókno długie jest używane do produkcji wysokiej jakości produktów *Linianych*, natomiast krótkie definiowane jest jako odpad z długich włókien, które znajduje zastosowanie w produkcji produktów o niższej wartości, takich jak np.

maty, materace itp. (Jhala i Hall 2010). Przez wieki len włóknisty był uprawiany w celach tekstylnych oraz znajdował nowych zwolenników na całym świecie. W pracach badawczych w latach trzydziestych XX wieku zaczęto dostrzegać właściwości mechaniczne włókien lnianych, które były preludium do wykorzystania tego surowca jako wzmocnienie do materiałów kompozytowych, jednocześnie rozszerzając jego zastosowanie. Liczne wykorzystanie włókien lnianych oraz ciągły rozwój w kierunku coraz bardziej innowacyjnych materiałów sprawiają, że len jest rośliną o rosnącym znaczeniu przemysłowym, który jest przedmiotem wielu prac badawczych w dziedzinie inżynierii materiałowej. Znacznie mniej badań skupia się na lnie jako żywej roślinie w celu zbadania zależności między właściwościami włókien lnianych, a rozwojem roślin, z których pochodzą (Goudenhooff i in. 2019). Wyniki właściwości mechanicznych włókien lnianych często przedstawiane są bez podania informacji o pochodzeniu surowca, co powoduje duży rozrzut ich wartości. (Baley i Bourmaud 2014). Len, jak każda roślina, reaguje na stresy zewnętrzne, a na jej rozwój może wpływać tigmomorfogeneza, warunki środowiskowe lub rodzaj uprawy. Kontrola wzrostu rośliny pozwala osiągnąć włóknom optymalny poziom dojrzałości i wynikające z tego właściwości mechaniczne. Badania rozwoju włókien lnianych i parametrów wpływających na właściwości mechaniczne roślin mogą być sposobem kontrolowania i/lub optymalizacji wydajności włókien oraz produktów opartych na tym surowcu (Mouli i in. 2006).

1.1. Charakterystyka gatunku lnu

Len (*Linum* L.) jest rodzajem rośliny z rodziny lnowatych (*Linaceae*). Na świecie występuję ok. 200 gatunków lnu. Spotykany na różnych kontynentach strefie klimatu umiarkowanego i w strefie subtropikalnej, z największym zróżnicowaniem w rejonie Morza Śródziemnego (Phillips i Rix 2011). W Europie wyróżnia się 36 gatunków lnu, głównie w południowej części (Mabberley 2017). W Polsce występuje 6 gatunków. Najpowszechniej uprawianym gatunkiem jest len zwyczajny, który obecnie w stanie dzikim nie występuje, znany jest tylko z uprawy (Włodarczyk 2011). Jest to roślina jednoroczna o płytkim systemem korzeniowym. Odmiany, uprawiane do celów nasiennych są stosunkowo niskie i posiadają więcej torebek nasiennych od odmian uprawianych w celach włóknistych, które są wysokie,

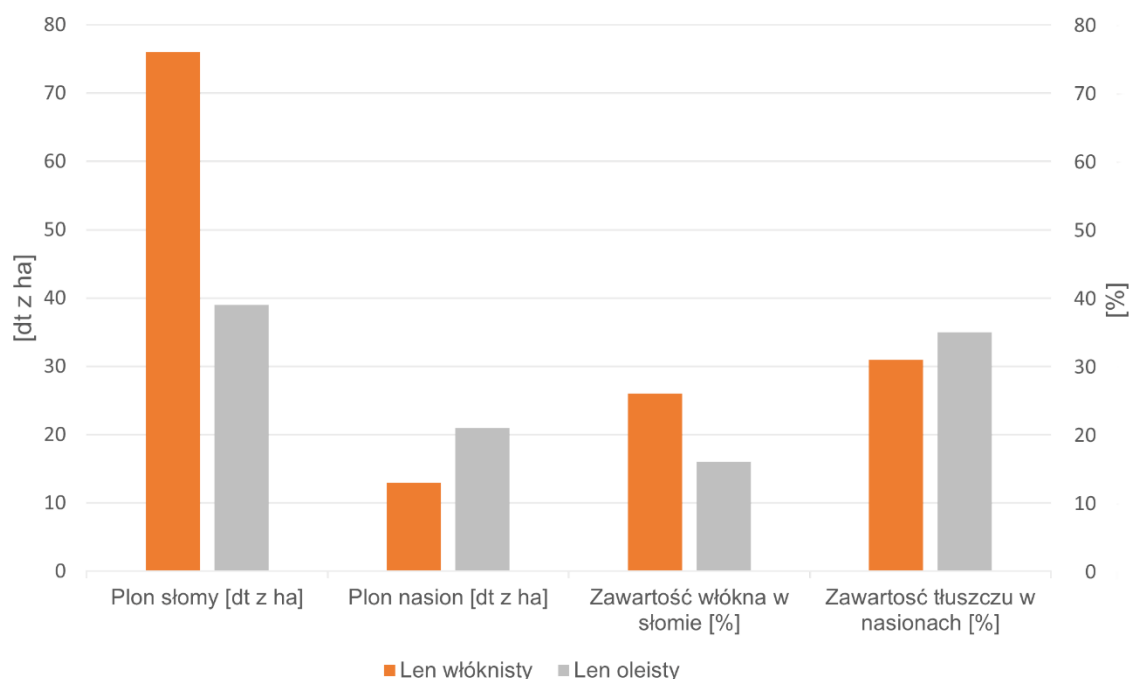
mają proste łodygi i są mniej rozgałęzione od odmian oleistych. Włókna występują na całej długości łodygi, dlatego podczas zbioru, po osiągnięciu przez roślinę tzw. dojrzałości włókna, roślinę wyrywa się z korzeniami (Jhala i Hall 2010). Len zwyczajny uważany jest za gatunek o największym znaczeniu praktycznym ze względu na różnorodność zastosowań.

- Roślina włóknista – z łodyg, które poddaje się procesowi rosznienia pozyskuje się włókno długie w celu produkcji wysokiej jakości przędz mokroprzędzonych czesankowych, osnowowych, a następnie tkanin lub dzianin. Podczas procesów przetwórczych pozyskuje się jako produkt uboczny włókno krótkie, które można przerabiać systemem zgrzebnym do celów tekstylnych, technicznych i kompozytów. Z roślin o grubszych łodygach, włókno pozyskuje się metodą dekortykacji z przeznaczeniem na zastosowania techniczne i kompozyty. Dodatkowym produktem ubocznym są paździerze wykorzystywane w budownictwie ekologicznym lub do celów energetycznych.
- Roślina oleista – z nasion produkuje się olej jadalny oraz przemysłowy. Nasiona lnu zawierają ok. 36–40% oleju (Popa i in, 2012).
- Roślina lecznicza:
 - Olej lniany jest bogatym źródłem nienasyconych kwasów tłuszczowych omega-3 i omega-6, które sprzyjają obniżaniu poziomu cholesterolu we krwi. Zawiera również witaminę E - naturalny przeciwutleniacz, który wymiata wolne rodniki z organizmu zapobiegając tym samym licznyom powikłaniom zdrowotnym. Olej zewnętrżnie używa się w przypadku stanów zapalnych skóry.
 - Siemię lniane ma ochronne działanie powlekające śluzówki układu pokarmowego. Jest stosowane wewnętrżnie przy nieżytach żołądka, jelit, pęcherza moczowego i dróg moczowych.
 - Jako rośliny lecznicze wykorzystywane są także: *Linum catharticum* L. oraz *Linum lewisii* (Mabberley 2017).
- Roślina ozdobna – pełni funkcje dekoracyjne, sadzona jest na rabatach, w ogrodach skalnych oraz w runie parkowym. Wyróżnia się również inne gatunki ozdobne: len złocisty *Linum flavum* (kwiaty żółte), len wielkokwiatowy

Linum grandiflorum (kwiaty czerwone), len trwały *Linum perenne* i len narboński *Linum narbonense* (kwiaty niebieskie) (Mabberley 2017).

- Inne - wyłoki z produkcji oleju wykorzystuje się przy produkcji paszy dla zwierząt. Zdrewniałe pozostałości części łodygi lnu znajdują zastosowanie przy wytwarzaniu płyt wiórowych. Z roślin lnu pozyskuje się też celulozę do wykorzystania w przemyśle papierniczym.

Dzielenie odmian lnu na poszczególne formy tzn. włókniste lub oleiste jest zwykle umowne i obarczone błędami, a do oceny typu użytkowego konieczna jest znajomość plonu nasion, plonu słomy, zawartości oleju, zawartości włókna w słomie i ogólnego plonu włókna. Odmiany lnu włóknistego charakteryzują się wysoką zawartością włókna (23–25%) (Strażyński i in. 2017), o jakości odpowiedniej do celów przędzalniczych oraz znaczną wysokością roślin i małą liczbą rozgałęzień, co skutkuje niewielkim plonem nasion. Formy oleiste charakteryzują się niższym plonem słomy w porównaniu do włóknistych, ale wyższym plonem nasion. Zawartość włókna w słomie jest wyższa dla odmian włóknistych, a zawartość tłuszczu w nasionach dla oleistych (rys. 1). Podział na len włóknisty i oleisty jest umowny, ponieważ obserwuje się dużą zależność cech fenotypowych lnu od warunków środowiskowych (Silska i in. 2014). Wałkowski i in. opisują ogólną charakterystykę trzech form lnu. Forma oleisto-włóknista (przejściowa) charakteryzuje się wysokością roślin 50–80 cm, a masa 1000 nasion wynosi 5,0–6,5 g. Z kolei do form włóknistych zalicza się rośliny o wysokości 70–120 cm oraz masie 1000 nasion 3,5–5,5 g (Wałkowski i in. 1998). Formy oleiste charakteryzują się wysokością do 60 cm (Strażyński i in. 2017) i masą 1000 nasion 6,8–8,2 g (Zajac i in. 2002).



Rys. 1. Porównanie wybranych cech odmian dwóch form lnu: włóknistego i oleistego
Źródło: (Strażyński i in. 2017)

1.1.1. Charakterystyka morfologiczna lnu

Łodyga

Len jest jednoroczną rośliną, która drewnieje u nasady. Proste łodygi posiadają grubą korą pierwotną. W celu oceny łodyg stosuje się różne wskaźniki, takie jak: rodzaj wiechy, wysokość rośliny (długość ogólna), długość łodygi (długość techniczna), długość wiechy, liczba rozgałęzień (wiechy) pierwszego rzędu, grubość łodygi oraz wysmukłość. Wiecha jest uważana za wyprostowaną, gdy część wierzchołkowa łodygi jest w prostej pozycji, natomiast za zwiśłą, gdy część wierzchołkowa łodygi jest zwisająca. Dodatkowo wiechę można określić jako rozpięchłą lub skupioną. Wysokość rośliny równa długości ogólnej, to odległość rośliny między szyjką korzeniową, a wierzchołkiem łodygi (zakończenia wiechy). Długość techniczna łodygi to odległość od nasady liścieni (górna krawędź szyjki korzeniowej) do nasady najniższego rozgałęzienia. Długość wiechy to odległość od najniższego rozgałęzienia do wierzchołka łodygi, która jest różnicą długości ogólnej rośliny długość techniczną, a długością ogólną rośliny. Grubość,

czyli średnicę łodygi mierzy się w środkowej części długości technicznej. Współczynnik wysmukłości łodygi to stosunek długości technicznej do średnicy łodygi w środku długości technicznej (Woyke i Muśnicki 2003).

Liście

Liście Inu są pojedyncze, zwykle lancetowate z wyraźną żyłką centralną (Phillips i Rix 2011). Wyróżnia się ulistnienie skrętogłębłe (Szafer i Kulczyński 1953), gdzie liście wyrastają kolejno na łodydze w linii o kształcie helisy (Szweykowska i Szweykowski 2003).

Kwiaty

Kwiaty Inu są obupłciowe, rozwijają się na końcach rozgałęzionych pędów. Charakteryzują się pięcioma działkami kielicha które, zwykle mogą być niezależne lub czasem zrosnięte u nasady. Okres kwitnienia jest krótki. Wyróżnia się również pięć płatków o swobodnym ułożeniu, występujących w barwie niebieskiej, żółtej, czerwonej, różowej lub białej. Liczba pręcików wynosi pięć, z nitkami poszerzonymi u nasady i częściowo złączonymi, z przemiennie do nich wyrastającymi prątniczkami (Phillips i Rix 2011).

Owoce

Torebki Inu są podzielone na dziesięć komór. Nasiona są spłaszczone, brązowe lub złote. Silnie śluzowacieją w kontakcie z wodą (Phillips i Rix 2011). Ocena nasion polega na określeniu ich barwy oraz oznaczeniu masy 1000 sztuk nasion.

1.1.2. Produkcja Inu oraz znaczenie gospodarcze

Rośliny przemysłowe spełniają ważną rolę w produkcji rolniczej. Dostarczają surowca wielu gałęziom przemysłu, ich uprawa oraz przerób daje zatrudnienie setkom tysięcy osób. Uprawa roślin przemysłowych wymaga dużego doświadczenia, wiedzy oraz jest nośnikiem postępu w całym rolnictwie. Do

najważniejszych roślin przemysłowych w Polsce należą: burak cukrowy, rzepak, cykoria, len, tytoń, chmiel oraz rośliny zielarskie (Berbeć 2005).

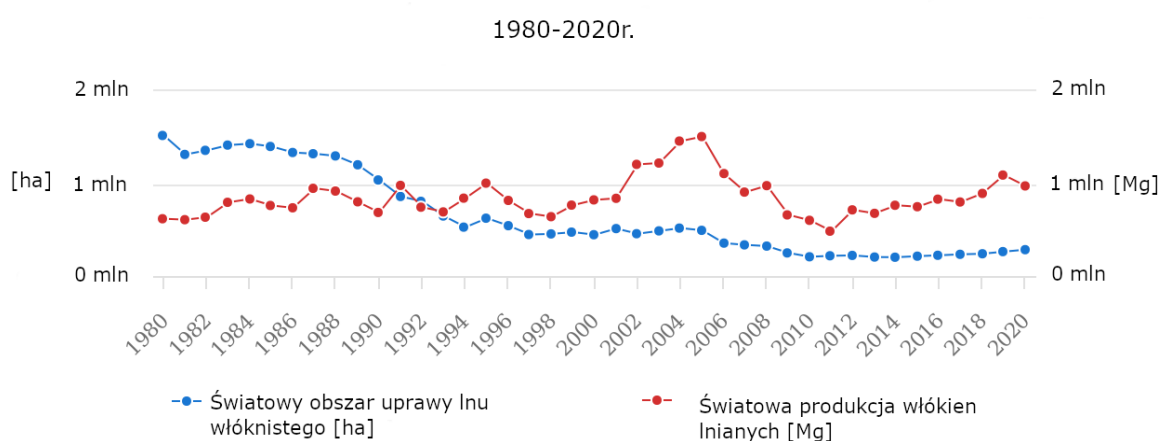
Od wielu lat głównym producentem i eksporterem nasion lnu była Kanada. Wzrost areału uprawy oraz plonowania lnu w Kazachstanie spowodował, że kraj ten stał się liderem w uprawie tego surowca od 2017 roku. Rosja zajmuje drugie miejsce w światowej czołówce producentów nasion lnu, a Kanada spadła na trzecie miejsce w 2020r. Francja od lat zajmuje pierwsze miejsce w rankingu jako główny producent włókna lnianego, trzepanego na świecie (tabela 1) (FAOSTAT [online], [dostęp 15 grudnia 2022]), W Polsce w ostatnich latach odnotowuje się wzrostu areału uprawy lnu. Jednak ma ona znikomy udział w światowym oraz europejskim rynku tych surowców. Ponadto krajowa produkcja nie pokrywa wzrastającego zapotrzebowania na siemię lniane i wyprodukowany z niego olej, co skutkuje koniecznością importu tych produktów. Głównymi producentami oleju lnianego w Polsce są małe, rodzinne przedsiębiorstwa z wieloletnią tradycją (Popis 2015).

Tabela 1. Ranking 10 krajów produkujących len włóknisty oraz oleisty w 2020r.

Len włóknisty			Len oleisty		
L.p.	Państwo	Produkcja [Mg]	L.p.	Państwo	Produkcja [Mg]
1	Francja	745570	1	Kazachstan	1058247
2	Belgia	81660	2	Rosja	787923
3	Białoruś	47778	3	Kanada	578000
4	Rosja	39262	4	Chiny	330000
5	Chiny	23646	5	Stany Zjednoczone Ameryki	144940
6	Wielka Brytania	14773	6	Indie	121000
7	Egipt	7768	7	Etiopia	80457
8	Królestwo Niderlandów	7350	8	Francja	59430
9	Chile	3078	9	Wielka Brytania	57000
10	Argentyna	2601	10	Afganistan	34216
Światowa produkcja		976113	Światowa produkcja		3367331

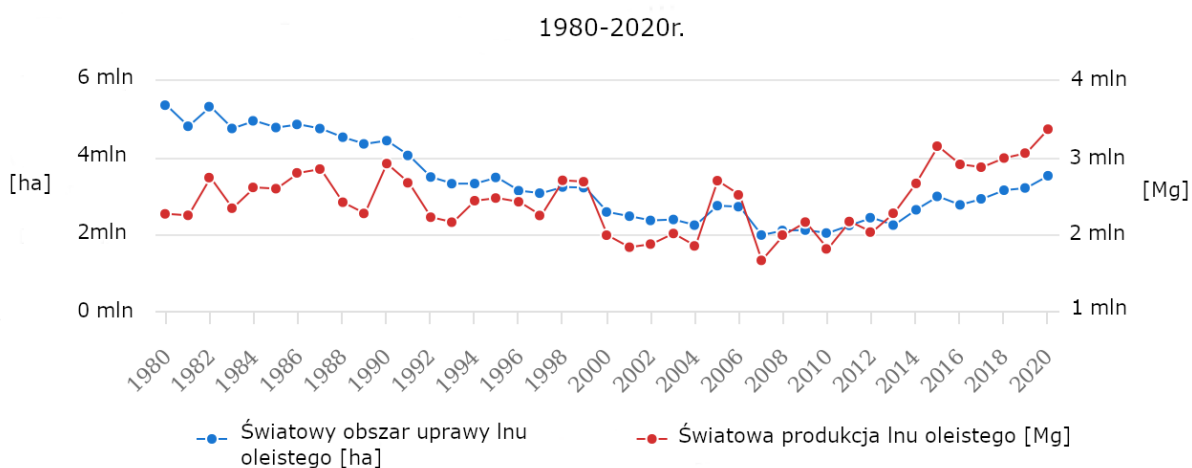
Źródło: (FAOSTAT [online], [dostęp 15 grudnia 2022])

Na początku lat dziewięćdziesiątych XX w. zmieniła się tendencja światowej produkcji włókien lnianych w porównaniu do areału upraw lnu (rys. 2). Od tego czasu pomimo mniejszego obszaru upraw zauważono wzrost ilości pozyskiwanych włókien, co może świadczyć o lepszej wydajności plonu włókna pozyskiwanego z roślin na przestrzeni lat. W 2005r. osiągnięto rekordową ilość światowej produkcji włókien lnianych w latach 1980–2020, która następnie stopniowo spadała aż do 2011r. Areał upraw lnu oleistego znacząco zmalał od roku 1980. Z drugiej strony, światowa produkcja lnu oleistego stopniowo rośnie od 2007r., gdzie w ostatnich latach osiąga najwyższe wartości w minionym trzydziestoleciu (rys. 3).



Rys. 2. Światowa produkcja oraz powierzchnia uprawy lnu włóknistego w latach 1980-2020

Źródło: (FAOSTAT [online], [dostęp 15 grudnia 2022])



Rys. 3. Światowa produkcja oraz powierzchnia uprawy lnu oleistego
w latach 1980-2020

Źródło: (FAOSTAT [online], [dostęp 15 grudnia 2022])

1.1.3. Fazy rozwojowe lnu

Skala BBCH jest uniwersalnym kodem opisującym fazy rozwojowe roślin uprawnych, która jest wykorzystywana na całym świecie przez służby doradcze, producentów środków ochrony roślin oraz rolników (tabela 2). Założenia stosowania skali oparte są na obserwacji faz fenologicznych roślin. Każda faza wzrostu i rozwoju rośliny ma przypisany kod dziesiętny, który wskazuje w jakiej fazie rozwojowej roślina się znajduje. Len zwyczajny posiada dwie formy: jarą i ozimą, których wczesne fazy rozwojowe nieznacznie różnią się pomiędzy sobą. Forma jara lnu zwyczajnego jest uprawiana znacznie częściej niż forma ozima.

Główne fazy rozwojowe formy jarej lnu to:

- 0: Kielkowanie
- 1: Rozwój liści na pędzie głównym
- 3: Wzrost pędu głównego
- (brak fazy 4, która przypisywana rozwojowi rozmnażania wegetatywnego)
- 5: Rozwój kwiatostanu

- 6: Kwitnienie
- 7: Rozwój owoców
- 8: Dojrzewanie owoców i nasion

Tabela 2. Skala BBCH formy jarej lnu zwyczajnego

Główna faza rozwojowa	Kod	Opis
0: Kiełkowanie	00	Suche nasiona
	01	Początek pęcznienia nasion
	03	Koniec pęcznienia nasion
	05	Korzeń zarodkowy wydostaje się z nasiona
	06	Wzrost pierwszego korzenia, tworzenie włośników i korzeni bocznych
	07	Z okrywy nasiennej wyłania się kielek (hypokotyl) z liścieniami
	08	Hypokotyl z liścieniami rośnie w kierunku powierzchni gleby
	09	Liścienie przedostają się na powierzchnię gleby
1: Rozwój liści (główny pęd)	10	Liścienie całkowicie rozwinięte
	11	Faza 1 liścia
	12	Faza 2 liścia
	13	Faza 3 liścia
	...	...
	19	Faza 9 lub więcej liści właściwych
3: Wzrost (wydłużanie się) pędu głównego	30	Początek wzrostu pędu
	32	Pęd osiągnął 20% długości typowej dla odmiany
	33	Pęd osiągnął 30% długości typowej dla odmiany
	34	Pęd osiągnął 40% długości typowej dla odmiany

Źródło: (Strażyński i in. 2017)

Tabela 2. Skala BBCH formy jarej lnu zwyczajnego c.d.

Główna faza rozwojowa	Kod	Opis
3: Wzrost (wydłużanie się) pędu głównego	35	Pęd osiągnął 50% długości typowej dla odmiany
	...	...
	39	Pęd osiągnął 90% długości typowej dla odmiany
5: Rozwój kwiatostanu	50	Pąki kwiatowe zakryte w liściach
	51	Widoczne pierwsze pąki kwiatowe wysunięte z liści
	53	Dobrze widoczne pierwsze pąki kwiatowe
	55	Widoczne pierwsze pąki kwiatowe na bocznych rozgałęzieniach
	59	Widoczne pierwsze płatki kwiatowe, pąki kwiatowe nadal zamknięte
6: Kwitnienie	60	Otwarte pierwsze kwiaty (sporadycznie)
	61	Początek kwitnienia: 10% otwartych kwiatów
	62	20% otwartych kwiatów
	63	30% otwartych kwiatów
	65	Pełnia kwitnienia: 50% otwartych kwiatów, pierwsze płatki mogą opadać i zasychać
	67	Końcowa faza kwitnienia: większość płatków opadła
	69	Koniec fazy kwitnienia: widoczne ułożenie torebek nasiennych
7: Rozwój owoców (zielona dojrzałość lnu)	71	Początek rozwoju owoców, 10% torebek nasiennych uzyskało ostateczną wielkość
	73	30% torebek nasiennych osiągnęło ostateczną wielkość
	75	50% torebek nasiennych osiągnęło ostateczną wielkość

Źródło: (Strażyński i in. 2017)

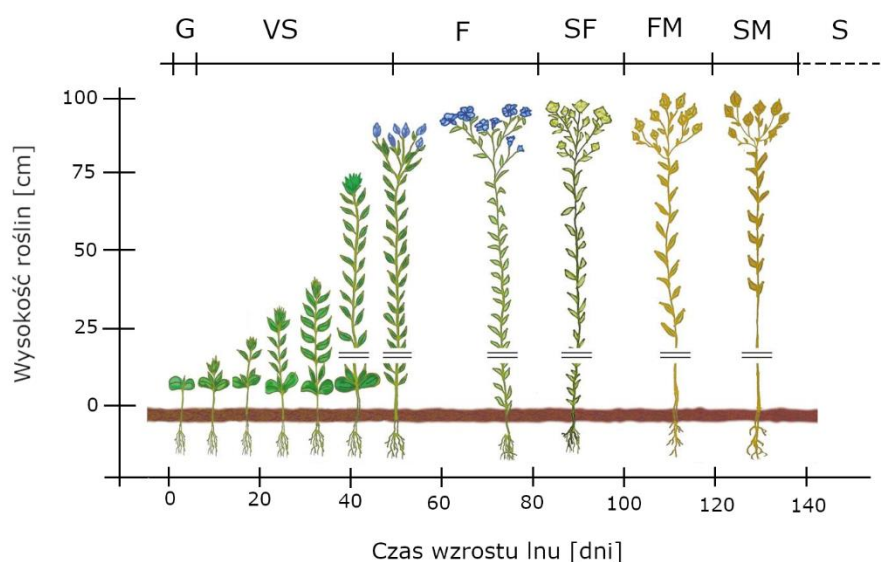
Tabela 2. Skala BBCH formy jarej lnu zwyczajnego c.d.

Główna faza rozwojowa	Kod	Opis
7: Rozwój owoców (zielona dojrzałość lnu)	77	70% torebek nasiennych osiągnęło ostateczną wielkość
	79	Prawie wszystkie torebki nasienne uzyskały ostateczną wielkość
8: Dojrzewanie owoców i nasion	81	Początek dojrzewania nasion, nasiona zielone, wypełniają zagłębienia w torebce
	83	Dojrzałość wczesnożółta (zielonożółta dojrzałość), łodygi pożółkłe do 1/3 wysokości, dolne liście opadły (1/4 wysokości roślin), torebki nasienne zaczynają żółknąć
	85	Dojrzałość żółta – łodygi całkowicie pożółkłe, dolne i środkowe liście opadły (2/3 wysokości roślin), torebki nasienne żółte, nasiona w pełni uformowane, zaczynają brązowieć
	89	Dojrzałość pełna, łodyga ciemnożółta, torebki nasienne i szypułki brązowe, suche nasiona
9: Starzenie, początek okresu spoczynku	97	Roślina zamiera i zasycha
	98	Zebrane nasiona, okres spoczynku

Źródło: (Strażyński i in. 2017)

Kiełkowanie nasion lnu rozpoczyna się przeważnie ok. 5–10 dni po siewie i charakteryzuje się pojawieniem dwóch w pełni rozwiniętych liścieni, klasyfikując go jako roślinę dwuliścienną. Etap wegetatywny zaczyna się dość wolno. Len osiąga wysokość 15 cm po ok. 15–20 dniach po kiełkowaniu. Następnie wyróżnia się okres szybkiego wzrostu, który trwa również ok. 15–20 dni. W tym czasie roślina lnu jest w stanie wydłużyć się o kilka centymetrów dziennie, osiągając 80–90 cm w 2-tygodniowym okresie szybkiego rozwoju. Tempo wzrostu rośliny zwalnia i kończy się podczas kwitnienia. W tym czasie len osiąga końcową długość ok. 1 m. Faza kwitnienia rozpoczyna się ok. 50 dni po kiełkowaniu i trwa ok. 15 dni na całym polu, mimo że, pojedynczy kwiat utrzymuje się tylko 1 dzień. Nasiona zawarte w torebkach nasiennych powstają od 15 dnia po kwitnieniu, a pełną dojrzałość osiągają po 5–6 tygodniach. Uprawy lnu z przeznaczeniem do celów włókienniczych

zazwyczaj zakończone są ok. 40 dni po kwitnieniu, gdy włókna są dojrzałe (dojrzałość zielonożółta). W takich przypadkach, len nie osiąga dojrzałości pełnej, a nasiona nie są w pełni uformowane. Ostatecznie uprawa lnu od zasiewu do dojrzałości zielonożółtej trwa ok. 100–120 dni (Goudenhoof t i in. 2019) (rys. 4).



Rys. 4. Schemat wzrostu lnu

G: kiełkowanie; VS: etap wegetatywny; F: kwitnienie; SF: tworzenie nasion;

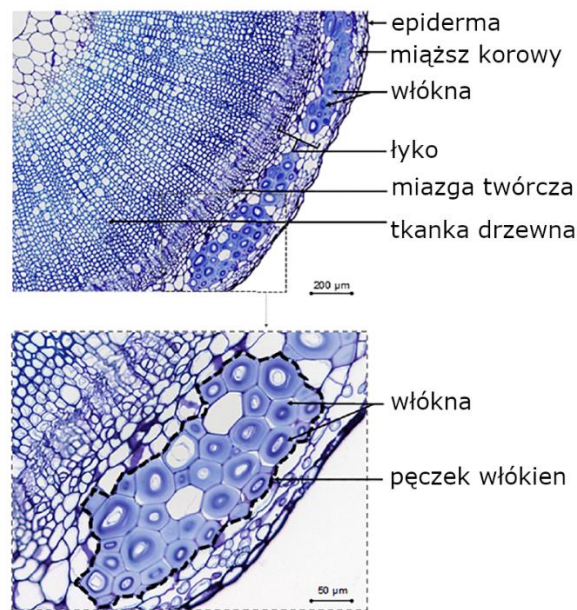
FM: dojrzałość włókien; SM: dojrzałość nasion; S: starzenie

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Goudenhoof t i in. 2019;

Wielgusz i in. 2022)

1.1.4. Organizacja wewnętrzna tkanek biologicznych Inu

Rośliny zbudowane są m.in. z organów wegetatywnych: liści, łodyg oraz korzeni, z których każdy pełni określone funkcje tworząc spójną strukturę. Łodyga Inu jest kluczowym organem ontogenezy włókna Inianego. Zbudowana jest z kilku rodzajów tkanek, utworzonych poprzez grupowanie różnych typów komórek, które różnią się od siebie położeniem, strukturą, pochodzeniem lub fazą rozwojową. Tkanki tworzące łodygę można podzielić na trzy podstawowe układy tkankowe: naskórkowe, naczyniowe oraz mięsiszowe. Każdy z nich jest inicjowany przez różnicowanie merystemów, czyli tkanek twórczych (Goudenhooft i in. 2019). Komórki te są zdolne do regularnych podziałów komórkowych, tworząc tkanki stałe, poprzez różnicowanie podziałów komórek potomnych (Szweykowska i Szweykowski 2003) takich jak np. włókna. Merystemy biorące udział w podłużnym wzroście łodygi nazywane są merystemami pierwotnymi i znajdują się na szczycie pędu oraz korzeni są odpowiedzialne za pierwotny wzrost. Wzrost wtórny, który prowadzi do powstania tkanek wtórnych, pochodzi z merystemów bocznych, jest odpowiedzialny za pogrubienie łodygi (Goudenhooft i in. 2019). Len jest rośliną zielną, która odnosi się do roślin wykazujących brak lub słaby wzrost tkanek wtórnych. Układ tkanek w łodydze określa i umożliwia funkcjonowanie tego narządu (Evert 2006). Podział komórek i tkanek na kategorie jest trudny ze względu na powstawanie całego systemu macierzystego w wyniku interakcji każdego z nich. W przekroju poprzecznym dojrzałej łodygi Inu (rys. 5) można wyróżnić główne tkanki lub komórki z włóknami zebranymi w wiązki (do 40 komórek na wiązkę) (McDougall i in. 1993) obecnymi na obrzeżach przekroju. Pęczek włókien jest elementem tkanki sklerenchymatycznej, której zadaniem jest wzmocnienie rośliny, poprzez nadanie jej sztywności. Dojrzałe komórki sklerenchymatyczne mają mocno zgrubiałe i silnie zdrewniałe ściany wtórne, inkrustowane ligniną, z licznymi jamkami (Szweykowska i Szweykowski 2003). Lokalizacja włókien w łyku pierwotnym doprowadziła do określania ich jako „włókna łykowe” (Bergfjord i Holst 2010). Len wytwarza tylko włókna pierwotne, pochodzące wyłącznie ze wzrostu pierwotnego (van Dam i Gorshkova 2003), natomiast w konopiach można wyróżnić włókna pierwotne oraz wtórne (Snegireva i in. 2015).

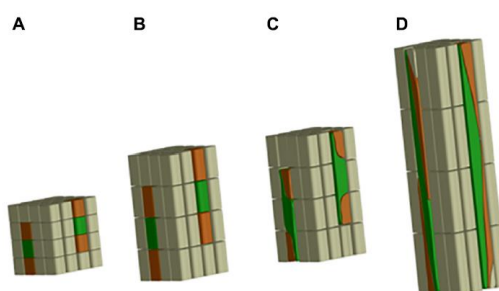


Rys. 5. Przekrój poprzeczny dolnej części łodygi lnu barwionego błękitem toluidynowym
Źródło: (Goudenhooft i in. 2019)

1.1.5. Wzrost komórek włókien lnianych

Włókno lniane charakteryzuje się bardzo dużym stosunkiem długości do średnicy, który jest większy niż 1000, imponująco grubą ścianą komórkową ok. 10 μm , zwężającymi się końcami oraz wrzecionowatym kształtem (Goudenhooft i in. 2019). Po rozpoczęciu wzrostu pierwotnego włókien, następują główne etapy: wydłużenie i pogrubienie ściany komórkowej (Roach i Deyholos 2007). Proces wydłużania włókien lnianych wraz z otaczającymi je tkankami rozpoczyna się od skoordynowanego formowania komórek, które ma miejsce tylko w odległości ok. 1–2 cm od wierzchołka rosnącej łodygi lnu i występuje we wszystkich typach komórek górnej części łodygi (van Dam i Gorshkova 2003). Różne rozmiary włókien mogą wynikać ze względu na różną częstotliwość podziału komórek i czas ustania podziału (Snegireva i in. 2010). W odległości 45–90 mm od wierzchołka rośliny znajduje się obszar zwany *ang. snap point*, w którym wzbogacone we włókna tkanki znacznie zmieniają swoje właściwości mechaniczne. Obszar ten występuje w fazie szybkiego wzrostu i zanika po zakończeniu wzrostu łodygi. Powyżej tego obszaru wydłużanie komórek włókna łykowego jest w pełni zakończone. Okres szybkiego

wzrostu jest czasem, w którym zostaje określona maksymalna długość wszystkich włókien łykowych w dojrzałej roślinie. Liczba włókien w wiązce nie jest jednakowa we wszystkich przekrojach poprzecznych łodygi. Po zakończeniu skoordynowanego wzrostu włókien, następuje wzrost inwazyjny komórek, który ma miejsce 3–8 cm poniżej *ang. snap point* (Gorshkova i in. 2003), charakteryzujący się większym tempem wzrostu podłużnego włókien od tempa wzrostu sąsiednich komórek. Komórka włóknista wsuwa się pomiędzy inne komórki, a oba jej końce tworzą „kolano” charakterystyczne dla początku inwazyjnego wzrostu (rys. 6). Kształty kolana zanikają wraz z postępem inwazyjnego wzrostu, a pojawienie się wrzecionowatego kształtu ze zwiężającymi się końcami następuje wraz z wydłużaniem się włókna (Ageeva i in. 2005). Inwazyjny wzrost trwa dłużej niż skoordynowany wzrost włókien, a mianowicie kilka dni, podczas których wydłużenie wynosi ok. 1–2 cm dziennie.



Rys. 6. Schemat ilustrujący wydłużenie włókna lnianego

A: Pierwsza faza skoordynowanego wzrostu;

B: zaawansowany stopień skoordynowanego wzrostu;

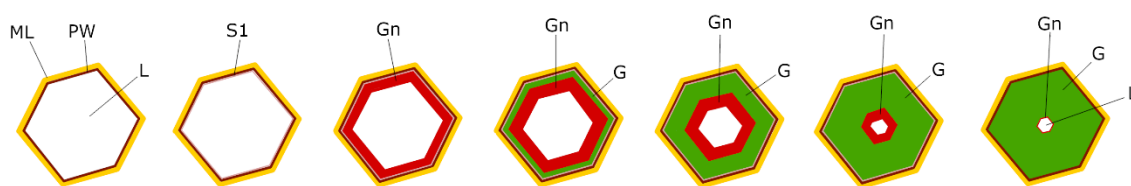
C: początek inwazyjnego wzrostu z włóknami;

D: zaawansowana faza inwazyjnego wzrostu

Źródło: (Goudenhoofd i in. 2019)

1.1.6. Wzrost grubości ściany komórkowej lnu

Pogrubienie ściany komórkowej jest procesem znacznie dłuższym niż wydłużenie komórki. W przypadku lnu trwa do osiągnięcia dojrzałości przez roślinę, czyli nawet do 60 dni (Gorshkova i in. 2003). W momencie powstania, komórka włókna lnianego, podobnie jak inne komórki roślinne, składa się z pierwotnej ściany komórkowej (PW) i łączy się z inną komórką poprzez otaczające ją blaszki środkowe (ML) (rys. 7). Pierwotna ściana komórkowa jest bardzo cienką i rozciągliwą strukturą, której wytrzymałość pozwala na osadzanie się nowych warstw wewnątrz komórki (S1). Warstwa G charakteryzuje się wysoką zawartością celulozy (do 90%) o wysokiej krystaliczności, niskim kącie mikrowłókien celulozowych, które są prawie równoległe do osi podłużnej włókna. Charakteryzuje się brakiem ligniny oraz ksylanu, natomiast zawiera dużą ilość wody. Kolejna warstwa Gn jest cienką warstwą osadzoną wewnątrz włókna, która zwykle jest słabo widoczna, określana jako warstwa przejściowa. W przypadkach egzogenicznych jak np. susza, warstwa Gn może pozostać zauważalna. W sprzyjających warunkach, stopniowo przekształca się w dojrzałą warstwę G poprzez pogrubienie ściany komórkowej, zwiększając grubość warstwy G. Warstwa Gn ma luźną strukturę w porównaniu do warstwy G, która jest zwarta i jednorodna (Goudenhoofft i in. 2019).



Rys. 7. Etapy pogrubienia włókna lnianego

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Goudenhoofft i in. 2019)

1.1.7. Skład i organizacja ściany komórkowej włókien lnianych

Skład i organizacja składników ściany komórkowej lnu są przedmiotem licznych badań, ponieważ wyniki różnią się między autorami (Goudenhooff i in. 2019). Uznaje się, że te cechy mogą być skorelowane z właściwościami mechanicznymi włókien lnianych (Lefeuvre i in. 2014). Średnia grubość ścian komórkowych, orientacja mikrofibryl oraz skład różnią się od siebie w zależności od warstwy włókna (tabela 3). Na budowę wewnętrzną mogą mieć wpływ: dobór odmiany lnu, warunki wzrostu, praktyki kulturowe itp. (Alix i in. 2009). Przybliżony skład warstwy Gn nie jest szczegółowo opisany w literaturze. Szacuje się, że skład warstwy Gn jest dość podobny do składu warstwy G (Goudenhooff i in. 2019).

Tabela 3. Charakterystyka i przybliżony skład różnych warstw ściany komórkowej włókien lnianych

Warstwa ściany komórkowej	Średnia grubość	Orientacja mikrofibryl	Przybliżony skład
PW	0,2 μm	orientacja rozproszona, preferencyjnie 0°	~25–40% celulozy ~30% hemicelulozy ~30% pektyny
S1	0,5 μm	60 - 80°	~30–50% celulozy ~30% hemicelulozy ~5% pektyny ~10–20% ligniny
G	do 15 μm	8 - 10°	~75–90% celuloza ~15–20% hemiceluloza ~5–10% pektyny
Gn	0,5 – 1 μm	heterogeniczna struktura	- celuloza - hemiceluloza - pektyny

Źródło: (Goudenhooff i in. 2019)

1.1.8. Dobór odmian Inu

Selekcja roślin uprawnych jest istotnym procesem dla osiągnięcia uprawy roślin z przeznaczeniem przemysłowym, której celem jest zmiana regularnych cech udomowionej rośliny na rzecz promowania jej z jedną lub kilkoma pożądanymi właściwościami. Polega ona na uprawie istniejących odmian o pożądanych właściwościach w celu uzyskania nowej wyselekcjonowanej odmiany, która będzie wykazywać zalety obojga rodziców. Selekcja jest sztucznym procesem, który nie wystąpiłby w sposób naturalny. W przypadku Inu, który jest rośliną samozapylającą, krzyżowanie odbywa się w sposób manualny z kwiatów przez hodowców. Uzyskanie genetycznie utrwalonej odmiany i prawidłowe jej rozmnożenia zajmuje ponad 10 lat. Główną ideą selekcji odmian roślin są np. zwiększenie plonów, pozyskanie większych ziaren, grubsza słoma, uzyskanie nasion łatwiej oddzielających się od plew itp. Selekcja odmian roślin spożywczych koncentrowała się na hodowli odmian karłowatych w celu zmniejszenia ich podatności na wyleganie, jednak selekcja odmian Inu nigdy nie miała na celu zmniejszenia wysokości roślin. Pożądane jest, aby rośliny o optymalnej wysokości zapewniały wyższe plony, ponieważ włókna są ekstrahowane z łodygi (Goudenhooft i in. 2019). Obecnie oczekuje się, że nowe rodzaje upraw wykroczą poza uprawę selektywną, a nowe rośliny będą charakteryzować się jeszcze większym plonem.

W Polsce w Krajowym Rejestrze Odmian znajduje się aktualnie pięć odmian Inu włóknistego: Hera, Modran, Nike, Sara, Selena oraz cztery odmiany Inu oleistego: Bukoz, Jantarol, Silesia, Szafir (Centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin Uprawnych [online], [dostęp 21 marca 2023]). Krajowe odmiany są dobrze dostosowane do polskich warunków siedliskowych (zwłaszcza gleby i warunków klimatycznych). W uprawie można spotkać również odmiany zagraniczne, przeważnie o większych wymaganiach siedliskowych i agrotechnicznych. (Strażyński i in. 2017). We Wspólnotowym Katalogu Odmian Roślin Rolniczych, który opracowuje Komisja Europejska, na bazie krajowych rejestrów państw członkowskich znajdują się odmiany roślin dopuszczone do obrotu na terytorium Unii Europejskiej. W 2021r. znajdowało się 159 odmian Inu zwyczajnego, w tym 57 odmian włóknistych Inu, 64 odmian oleistych Inu oraz 38 odmian o nieoznaczonej użytkowości (Centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin Uprawnych [online],

[dostęp 29 grudnia 2022]). Zarejestrowane w Polsce odmiany lnu włóknistego i oleistego wykazują różnicowanie cech użytkowych: plon słomy, nasion oraz jakość, m.in. zawartość włókna w słomie i tłuszczu w nasionach. Odmiany różnią się między sobą początkową fazą rozwoju, wysokością roślin oraz odpornością na wyleganie i choroby. Krajowe odmiany lnu włóknistego cechują się dość dobrą wydajnością i jakością włókna długiego (Strażyński i in. 2017).

Odmianami lnu włóknistego, które charakteryzują się wolniejszym tempem wzrostu w pierwszym okresie rozwoju są odmiany: Nike, Sara i Jan. Odmiana Jan wykazuje się większą tolerancją na okresy niedoboru wilgoci oraz wysoką temperaturę. Odmiana Modran wyróżnia się wcześniejszym kwitnieniem i dojrzałością w porównaniu do innych odmian. Odmiany uprawiane w Polsce w większości przejawiają stosunkowo małą podatność na wyleganie (Strażyński i in. 2017). Właściwości botaniczno-użytkowe wybranych odmian lnu zwyczajnego zestawiono w tabeli 4, a właściwości rolniczo-użytkowe w tabeli 5.

Tabela 4. Właściwości botaniczno-użytkowe wybranych odmian lnu zwyczajnego

Nazwa odmiany	Wysokość roślin	Termin kwitnienia	Barwa kwiatów (płatki korony)	Torebka nasenna	Termin dojrzałości technologicznej	Barwa nasion	Masa 1000 nasion [g]
Odmiany lnu włóknistego							
Artemida	średnia do wysokiej	średni	niebieska	średnia	średni	brązowa	mała do średniej
Atena	średnia	wczesny do średniego	niebieska	średnia	średni	brązowa	średnia
Jan	średnia do wysokiej	średni do późnego	niebieska	średnia	średni do późnego	brązowa	mała do średniej
Luna	średnia	Wczesny do średniego	niebieska	średnia	średni	brązowa	średnia

Źródło: (Strażyński i in. 2017)

Tabela 4. Właściwości botaniczno-użytkowe wybranych odmian Inu zwyczajnego c.d.

Nazwa odmiany	Wysokość roślin	Termin kwitnienia	Barwa kwiatów (płatki korony)	Torebka nasenna	Termin dojrzałości technologicznej	Barwa nasion	Masa 1000 nasion [g]
Modran	średnia	Wczesny do średniego	niebiesko-fioletowa	średnia	wczesny do średniego	brązowa	mała do średniej
Nike	średnia	średni	niebieska	średnia	średni	jasno-brązowa	średnia
Sara	średnia do wysokiej	średni do późnego	niebieska	średnia	średni do późnego	brązowa	mała do średniej
Selena	średnia	średni	niebiesko-fioletowa	średnia	średni	brązowa	średnia
Temida	średnia	średni	niebieska	średnia	średni	brązowa	średnia
Odmiany Inu oleistego							
Bukoz	niska	wczesny do średniego	blado-niebieska	średnia	średni do późnego	jasno-brązowa	średnia do dużej
Jan-tarol	niska do średniej	średni	biała	średnia do dużej	średni do późnego	żółta	średnia do dużej
Oliwin	niska	wczesny do średniego	niebiesko-fioletowa	średnia do dużej	średni	żółta	duża
Szafir	niska do średniej	średni	fioletowa	średnia do dużej	średni do późnego	jasno-brązowa	duża

Źródło: (Strażyński i in. 2017)

Tabela 5. Właściwości rolniczo-użytkowe wybranych odmian włókniстых lnu zwyczajnego

Nazwa odmiany	Plon słomy [dt/ha]	Plon nasion [dt/ha]	Plon włókna ogółem [dt/ha]	Długość okresu wegetacji (dni)	Wydajność włókna ze słomy surowej odziarnionej [%]		Zawartość tłuszczu w nasionach [%]
					ogółem	długie	
Artemida	78,0	9,0	18,0	104	23,1	18,2	40,1
Atena	82,3	10,4	19,4	105	23,6	18,5	39,3
Jan	77,6	10	17,5	106	22,6	17,3	39,3
Luna	80,4	8,8	17,6	102	21,9	16,7	39,2
Modran	79,9	8,8	18,2	100	22,9	18,2	39,9
Nike	82,0	10,5	18,0	106	21,9	16,1	40,7
Sara	86,7	9,4	19,2	106	22,1	16,6	39,9
Selena	78,2	8,9	17,0	101	22,7	18,0	39,8
Temida	82,7	9,4	20,0	101	24,1	18,9	38,5

Źródło: (Heller 2012)

W hodowli lnu włókniстого, uzyskanie nowej odmiany trwa dziesięć lat. Głównym celem prac hodowlanych lnu jest otrzymanie bioróżnorodności genów *Linum*, które oceniane są w aspekcie odporności na stresy biotyczne, abiotyczne, waloryzowane z zastosowaniem metody markerów fenotypowych oraz genotypowych. Priorytetowe zadania w hodowli twórczej lnu włókniстого opierają się na zwiększeniu zawartości oraz poprawie jakości włókna, zwiększenie odporności lnu na wyleganie i choroby, poprawie plonowania w niekorzystnych warunkach oraz skrócenie czasu wegetacji. Efektem prac hodowlanych prowadzonych metodą rodowodową jest uzyskanie nowych odmian lnu, które charakteryzują się wyższą wartością użytkową: Milenium, Fortuna, Izolda, Bryta, Svapo, Waza, Minerwa, Nike, Alba, Ariadna, Wiko, Artemida, Modran, Selena, Luna, Atena, Sara, Temida i Jan (Strażyński i in. 2017). Istnieją badania (Singh i Pankaj 2018 oraz Xie i in. 2018) nad krzyżowaniem odmian w zamyśle otrzymania „dwucelowej” formy lnu uprawnego, jako sposób zwiększenia opłacalności uprawy. Odmiany dwucelowe stanowią próbę efektywnego połączenia wysokiego plonu nasion i wysokiego plonu włókna.

1.1.9. Odporność lnu zwyczajnego na suszę

Susza jest ważnym abiotycznym czynnikiem stresogennym, która ogranicza produktywność upraw. Niezależnie od okresu wegetacji roślin, ma charakter śmiertelny i obniża plonowanie na każdym etapie rozwoju. Rośliny, które są narażone na suszę wyzwalają szereg procesów molekularnych, biochemicznych oraz fizjologicznych w celu obrony przed skutkami stresu związanego z niedoborem wody. Biochemiczne reakcje roślin na stres suszy objawiają się zmianą zawartości np. przeciwutleniaczy, chlorofilu, akumulacją proliny. Transformacja pod względem fizjologicznym roślin opiera się np. na aktywności aparatów szparkowych, fotosyntezie, zawartości wody w liściach. Różnice w zakresie morfologicznym dotyczą m.in. zmniejszonej powierzchni liści oraz ich liczbie, długości korzeni, zmianie faz wzrostu oraz przedwczesnym dojrzewaniu roślin. Rośliny są bardziej wrażliwe na stres suszy podczas niektórych etapów wzrostu np. kiełkowania, kwitnienia, czy formowania ziarna (Oguz i in. 2022). Ponadto, okres wzrostu rośliny podczas suszy jest istotnym czynnikiem w obronie przed niedoborem wody (Çakir 2004).

Len jest bardzo wrażliwy na niedobór wody w glebie ze względu na swój system korzeniowy (Praczyk i Wielgusz 2021). Deficyt wody oraz wysokie temperatury podczas okresu wzrostu i rozwoju lnu włókniстого są czynnikami ograniczającymi jego plonowanie. W połowie okresu wegetacji, przeciętne zapotrzebowanie wody przez len wynosi 5 ml na 1 roślinę dziennie. W całym okresie wegetacji, wskaźnik zużycia wody przez len włókniсты wynosi 8 mln l/ha. Statystycznie udowodniono, że susza wpływa na zmniejszenie plonu: słomy odziarnionej, nasion oraz włókna lnu zwyczajnego. Do odmian, które w warunkach suszy dają relatywnie wysokie plony włókna należą: Nike, Modran, Luna, Artemida, Venica, Diana, Drakkar oraz Alize. Odmiany lnu, które charakteryzują się wolniejszym tempem wzrostu w pierwszym okresie rozwoju (Nike, Drakkar, Venica) są bardziej odporne na suszę od odmian, które dojrzewają wcześniej. Odmiany lnu oleistego Alfonso i Symphonia oraz odmiana lnu włókniстого Artemida charakteryzują się wysokim plonem nasion w warunkach suszy. Odmiana lnu włókniстого Jan posiada zwiększoną tolerancję na wysokie temperatury oraz okresy posuchy (Strażyński i in. 2017). W badaniach Hellera i Byczyńskiej

wykazano, że zastosowanie kontrolowanego stresu suszy zmniejszyło plony o 39,7–49,3% w zależności od odmiany w porównaniu z roślinami uprawianymi w optymalnych warunkach. Wśród testowanych odmian wyróżniono najwyższe plony słomy dla odmian: Sara, Ilona, Alizée, Nike oraz Luba. Natomiast najwyższą zawartością włókna charakteryzowały się odmiany: Agatha, Escalina, Luna, Artemida i Ilona. Najlepszą jakością włókien wyróżniały się odmiany: Agatha oraz Diane. Najwyższe plony nasion wyodrębniono dla odmian Alfonso, Symphonia oraz dla odmiany włóknistej Artemida (Heller i Byczyńska 2015). Len włóknisty charakteryzuje się gorzej wykształconymi korzeniami w porównaniu do Inu oleistego, w efekcie wyróżnia się niższą odpornością na suszę od odmian oleistych (Strażyński i in. 2017).

Susza przyspiesza wytwarzanie w roślinie reaktywnych form tlenu, która uruchamia ogrom antyoksydacyjnych mechanizmów obronnych, wpływając na wiele procesów metabolicznych oraz na ekspresję genów indukowanych stresem. Rośliny reagują na suszę poprzez gromadzenie rozpuszczalnych związków w cytoplazmie, takich jak: prolina, glicyna-betaina, glukoza, fruktoza, mannitol, inozytol, walina, izoleucyna itp, których zadaniem jest regulacja równowagi osmotycznej rośliny, utrzymująca przepływ wody, zapewniająca stabilność molekularną oraz zapobieganie gromadzeniu się wolnych rodników związanych ze stresem (Easwar Rao i Chaitanya 2016). System antyoksydacyjny i regulacja osmotyczna roślin są głównymi systemami obronnymi, zapewniającymi tolerancję roślin na warunki związane ze stresem suszy (Hossain i in. 2013).

1.2. Ogólne zasady agrotechniki w uprawie lnu

1.2.1. Wymagania klimatyczne

Len włóknisty najlepiej rozwija się w klimacie umiarkowanym i wilgotnym, gdzie dzienna temperatura nie przekracza 30°C (Goudenhooft i in. 2019). Powinien być uprawiany na obszarach, gdzie roczna suma opadów wynosi co najmniej 600–650 mm, a w okresie wegetacji 110–150 mm (Heller i Byczyńska 2015). Rejony umiarkowane i morskie Belgii, Holandii, Francji w przybrzeżnej Europie Zachodniej są odpowiednimi lokalizacjami do uprawy lnu (Goudenhooft i in. 2019). Współczynnik transpiracji, określający ilość pobranej i wyparowanej wody potrzebnej do wyprodukowania 1 kg suchej masy słomy (Lewak 2009) dla lnu włóknistego wynosi 400-600 l. Wilgotność gleby utrzymywana na optymalnym poziomie decyduje o równych wschodach roślin, a w okresie intensywnego wzrostu lnu (BBCH 32-35) wpływa na plon. Ponadto, len włóknisty silnie reaguje na wilgotność powietrza. Len oleisty jest rośliną bardziej odporną na wysokie temperatury i suszę (Strażyński i in. 2017).

1.2.2. Wymagania glebowe

Właściwe stanowisko, zmianowanie upraw oraz dobór przedplonu są podstawą integrowanej ochrony roślin. Wymagania glebowe lnu włóknistego są mniejsze od wymagań dla lnu oleistego. Uznaje się, że len włóknisty dobrze wzrasta po każdej roślinie, która dała poprzedniego roku dobry plon oraz zostawiła glebę w kulturze. W warunkach intensywnej gospodarki jako przedplon lnu stosuje się zboża oraz buraki. Istnieje zasada mówiąca o tym, że lnu nie powinno się uprawiać na tym samym polu nie wcześniej niż po 7 latach, w wyniku potrzeby samooczyszczenia gleby z patogenów *Fusarium* (Heller 2012). Zaleca się uprawianie lnu włóknistego na glebach czystych, niezachwaszczonych oraz roli skrupulatnie uprawionej. Unika się stanowisk, które są bogate w azot ze względu na ryzyko wylegania lnu. Odmiany lnu oleistego wymagają natomiast żyznych gleb, w klasie bonitacyjnej co najmniej IVa (Strażyński i in. 2017).

Odpowiednio przygotowana gleba zapewnia roślinom lnu optymalne warunki dla wzrostu oraz rozwoju. Wyróżnia się gruzelkową, luźną strukturą, która umożliwia dostęp powietrza do korzeni i mikroflory glebowej oraz pochłania i zatrzymuje wodę. Charakteryzuje się wysoką pojemnością wodną, która pozwala w czasie suszy zachowywać umiarkowaną wilgotność oraz odpowiednią przewodność. W warunkach optymalnej wilgotności gleby plon lnu o odpowiedniej gruzelkowej strukturze jest o 25% wyższy niż na glebie zbitej. Odczyn pH gleby powinien być zbliżony do obojętnego i wynosić 6,5–6,9. Niezbędne zabiegi jakie należy wykonać przed każdym siewem dotyczą przerwania parowania wody z gleby, w celu pobudzenia nasion chwastów do kiełkowania. Następnie spulchnienie gleby oraz przerwanie kiełkujących chwastów odpowiednimi narzędziami. Gleby zbyt luźne należy wtórnie zagęścić. Podane zabiegi wykonuje się za pomocą agregatu uprawowego (Strażyński i in. 2017).

1.2.3. Siew

Rozwój roślin jest bardzo zależny od gęstości wysiewu, który wpływa na wielkość plonu oraz wysokość rośliny. Optymalna ilość wysiewu lnu na plantacjach przemysłowych wynosi 2000–2400 nasion/m², czyli ok. 110–130 kg/ha. W dniu zbioru zagęszczenie roślin powinno wynosić 1600–1800 szt./m² (Strażyński i in. 2017). Zwiększenie liczby nasion na m² wpływa negatywnie na wysokość łodygi. Obniżenie wysiewu do 400 nasion/m² pozwala uzyskać zjawisko odwrotne (Gubbels i Kenaschuk 1989), jednak nie stosuje się go ze względu na nieprzemysłowy charakter. Ponadto, zwiększenie normy wysiewu wpływa korzystnie na plon słomy oraz włókna. Wzrost ilości roślin na m² ma większy wpływ na plon niż spadek wysokości roślin (Bourmaud i in. 2016). Duże zagęszczenie lnu może powodować zmniejszenie ilości niepożądanych chwastów na polach (Stevenson and Wright 1996). Obecnie wykorzystuje się podobną technikę siewu rzędowego dla lnu i zbóż za pomocą tych samych siewników uprawowych (Summerscales i in. 2010). Uprawę lnu rozpoczyna się od siewu, zwykle gdy wierzchnia warstwa gleby osiąga temperaturę ok. 7–9°C (Goudenhooff i in. 2019). Do tego celu należy używać kwalifikowanego materiału siewnego, który charakteryzuje się zdolnością kiełkowania na poziomie min. 92% oraz zawartość nasion czystych powinna

wynosić min. 99%. Nasiona lnu sieje się na głębokości 2 cm, w celu zmniejszenia zaników nasion (Strażyński i in. 2017).

1.2.4. Zintegrowany system nawożenia

Nawozy sprzyjają uzyskaniu niezbędnego poziomu składników mineralnych w glebie w celu osiągnięcia potencjału upraw oraz pozwalają osiągnąć stabilność plonów. Niewystarczająca ilość składników pokarmowych w glebie jest impulsem do koniecznego nawożenia pól uprawnych, w celu poprawy właściwości podłoża dla lnu. Intensywne pobieranie składników pokarmowych rozpoczyna się od fazy szybkiego wzrostu lnu (BBCH 32), gdy rośliny osiągają wysokość ok. 20 cm. Natomiast, najwyższe zapotrzebowanie występuje w czasie tworzenia pąków kwiatowych (BBCH 51–59) oraz w fazie kwitnienia lnu (BBCH 61–69). Len włóknisty wymaga starannego nawożenia ze względu na wpływ składników pokarmowych na jakość włókna (Strażyński i in. 2017).

W celu efektywnego oddziaływania nawozów mineralnych na glebę podczas uprawy lnu, niezbędnym jest utrzymanie odczynu gleby zbliżonego do obojętnego (pH 6,5–6,9). Zalecane nawożenie opiera się na proporcji ilościowej azot : fosfor : potas w przybliżeniu 1:2:3 w następujących dawkach: 30–40 kg azotu, 60–80 kg fosforu, 90–120 kg potasu na ha. Wyniki laboratoryjne oceny stanu zawartości przyswajalnych składników pokarmowych w glebie pozwalają doprecyzować wielkość poszczególnych dawek nawozu. Azot powinno stosować się przed siewem w 60% zalecanej dawki. Dawkę uzupełniającą stosuje się w zależności do warunków glebowych oraz klimatycznych w początkowym okresie wzrostu lnu. Późniejsze zastosowanie może wpłynąć negatywnie na jakość włókna lnianego. Przekroczenie zalecanej dawki azotu powoduje wyleganie lnu, sprzyja rozwojowi chorób, powoduje zgrubienie łodyg oraz obniża wytrzymałość właściwą włókien. W wyniku nadmiernej ilości azotu, potas wpływa niekorzystnie na długość łodyg oraz zawartość włókna. W wyniku przenawożenia azotem plantacji lnu, mogą pojawić się problemy polegające na określeniu poszczególnych faz dojrzewania roślin. Słoma może nie przybierać koloru żółtego, a kolor zielony na łodygach będzie utrzymywać się dłużej. W takich sytuacjach termin zbioru ustalany jest na podstawie

dojrzałości torebek nasiennych lnu. Stosowanie fosforu jest niezbędne w celu uzyskania odpowiedniej długości słomy oraz liczby pęczków włókien wewnątrz rośliny. Z drugiej strony, nadmiar tego składnika powoduje skracanie i rozgałęzianie łodyg (Strażyński i in. 2017). Optymalny poziom fosforu dla lnu, wynosi 26 mg/kg gleby (Kurishbayev i in. 2020). Podczas wzrostu lnu nie można stosować nawozów wapniowych, ze względu na występowanie łamliwości włókna oraz jego drewnienie. Nawozy wapniowe, które m.in. zobojętniają kwaśny odczyn gleby można stosować pod przedplon. Odpowiednia ilość magnezu w glebie wpływa korzystnie na długość techniczną słomy, natomiast jego niedobór wpływa na chlorozę liści i skrócenie łodyg lnu. Niedobór miedzi, boru i cynku w glebie wpływa negatywnie na rośliny lnu. Niewystarczające ilości cynku objawiają się rozgałęzianiem lnu od nasady, co powoduje straty w plonach oraz otrzymywanie włókien gorszej jakości (Strażyński i in. 2017).

1.2.5. Zbiór

Termin zbioru wpływa na jakość słomy, a szczególnie włókna. Uzależniony jest od odmiany lnu, dojrzałości roślin oraz przeznaczenia plonu. Najlepszą jakość włókna osiąga się, gdy zbiór występuje w fazie zielonożółtej lnu. Opóźnienie zbioru wpływa negatywnie na jakość i ilość plonu, powodując zdrewnienie włókna oraz ryzyko występowania chorób. Wyróżnia się cztery terminy zbioru lnu, w zależności od fazy dojrzałości roślin:

1. Dojrzałość zielona (BBCH 71–79) – następuje ok. tydzień po przekwitnięciu kwiatów lnu. Charakteryzuje się zielonymi łodygami na całej długości rośliny, a dolne strony liści zaczynają żółknąć. Nasiona w zielonych torebkach nasiennych są miękkie, koloru białozielonego. Włókna nie są całkowicie wykształcone, a ich ścianki są miękkie i cienkie. W Belgii i Holandii dawniej zbierano len na tym etapie wzrostu w celu pozyskania specjalnych włókien do wyrobu batystów i cienkich koronek.
2. Dojrzałość wczesnożółta (BBCH 83) – występuje ok. tydzień po osiągnięciu przez len dojrzałości zielonej. Łodygi są koloru żółtego do ⅓ ich wysokości, a liście zaczynają opadać od dołu do ¼ długości

rośliny. Nasiona w lekko żółtych torebkach nasiennych są wykształcone i charakteryzują się żółtym kolorem. Ścianki włókien są pogrubione. Zbiory w fazie dojrzałości wczesnożółtej Inu z przeznaczeniem na włókno są powszechnie stosowane.

3. Dojrzałość żółta (BBCH 85) – występuje ok. tydzień po dojrzałości wczesnożółtej. Łodygi Inu na całej długości mają kolor żółty, a liście opadły z $\frac{2}{3}$ wysokości rośliny. Nasiona, w żółtych lub brunatnych torebkach nasiennych są w całości uformowane oraz zaczynają brązowieć. Dojrzałość żółta jest odpowiednią fazą do zbioru Inu w celach nasiennych.
4. Dojrzałość pełna – występuje ok. 10–12 dni po dojrzałości żółtej. Słoma charakteryzuje się ciemnożółtym kolorem, a od dołu jest brunatna. Brunatne torebki nasienne zawierają suche nasiona. Ponadto warunki atmosferyczne mogą wpływać na ich otwieranie się, rozkład szypułek i opadanie co większa straty nasion podczas zbioru. Na tym etapie istnieje ryzyko przenikania patogenów, jeśli plantacja była porażona grzybami, oraz zakażenie nasion i przeniesienie choroby na kolejny rok uprawy. Na roślinach Inu mogą pojawiać się nowe, zielone odrosty, a następnie ponowne kwitnienie (Strażyński i in. 2017).

1.3. Metody pozyskania włókien ze słomy lnu

Istnieje szereg metod pozwalający na oddzielenie włókna od zdrewniałych części roślin włóknistych. Roszenie słomy lnianej jest, po odziarnieniu, kolejną fazą obróbki słomy, której celem jest rozpuszczenie pektyn otaczających włókna, pełniących rolę tzw. klejów roślinnych (König 2020). Procesy odklejania włókien łykowych od zdrewniałych części rośliny lnu mają duży wpływ na końcową jakość włókien. Ponadto, metody różnią się od siebie nakładem pracy, kosztami energii oraz wpływem na środowisko (Mańkowski 2014). W celu pozyskania włókien, w zależności od wybranej metody, wyróżnia się oddziaływanie: czynnikami mechanicznymi, fizycznymi, chemicznymi oraz procesami biologicznymi na łodygi roślin łykowych (Konczewicz i in. 2011). Najbardziej rozpowszechnionymi rodzajami odklejania włókien są metody biologiczne: roszenie wodne oraz sianie lnu na polu. Roszenie wodne lnu było praktykowane w starożytnym Egipcie, które pozwalało pozyskiwać włókna wysokiej jakości z przeznaczeniem na cienkie przędze oraz tekstylia (Melelli i in. 2021). Początkowo, len roszone w naturalnych zbiornikach wodnych, a następnie w specjalnie przygotowanych w tym celu basenach (Konczewicz i Kozłowski 2007). Z powodów ekologicznych oraz ekonomicznych rezygnuje się z tej metody na rzecz siania lnu na polu. Ponadto, metody mechaniczne, chemiczne oraz fizyczne ekstrakcji włókien z rośliny lnu, które pomimo nieprzemysłowego charakteru są kierunkiem stanowiącym szerokie pole do rozwoju, pozwalając na uzyskanie indywidualnych cech włókna, charakterystycznych dla danej metody.

1.3.1. Przerób mechaniczny włókien lnianych

Słomę lnianą można poddać procesowi dekortykacji, który polega na mechanicznym usunięciu elementów niewłóknistych ze słomy niepoddanej procesowi roszenia. Przemieszczanie się surowej, suchej słomy przez walce międlące urządzenia wpływa negatywnie na jakość końcową surowca. W wyniku powstających naprężeń, włókna ulegają pęknięciom, które są przyczyną obniżonej wytrzymałości właściwej materiału. Włókna charakteryzują się słabą podzielnością, dużą zawartością zanieczyszczeń, pozostają sklejone w duże kompleksy

elementarnych włókien, są sztywne, a podczas zgrzeblenia powstaje duża ilość odpadów w postaci paździerzy i splątanych krótkich włókien. Istotnym parametrem dla tej metody jest wilgotność słomy, która powinna wynosić 14–16%. Wyższa lub niższa wartość wilgotności surowca powoduje obniżenie wydajności procesu (Różańska 2020).

Ze względu na otrzymaną jakość włókien, stosuje się w linii dekortykacyjnej dodatkowe elementy, które pozwolą doczyścić włókno do zawartości zanieczyszczeń na poziomie 5%. Włókna otrzymane metodą dekortykacji są pełnowartościowym surowcem o niskiej jakości. Z tego względu, nie znajdują zastosowania w przemyśle włókienniczym, ale wykorzystuje się je w przemyśle celulozowo-papierniczym, energetycznym, budowlanym oraz w produkcji materiałów kompozytowych (Kozłowski i in. 2004).

1.3.2. Metody biologiczne pozyskania włókien lnianych

Metody moczenia w wodzie lub słania na polu słomy lnianej stosuje się w celu biologicznej degradacji pektyn łączących włókno z otaczającymi tkankami. Początkowo wykonywano roszenie zimnowodne w miejscach, gdzie woda spiętrzała się na łąkach lub specjalnie kopano w tym celu doły. Wykorzystywano również naturalne zbiorniki wodne np. stawy lub rzeki. Czas trwania roszenia wodnego wpływa na wydajność otrzymywanego włókna, jego barwę, chwyt oraz wytrzymałość na rozciąganie (Ruan i in. 2015). W celu udoskonalenia metody, zaczęto wykonywać ciepłowodne roszenie w basenach, w kontrolowanych warunkach, gdzie dzięki podgrzaniu wody do temperatury ok. 30–32°C, skraca się czas roszenia w porównaniu do roszenia zimnowodnego. Roszenie lnu w ciepłej wodzie trwa ok. 70–100 h. Podczas roszenia zimnowodnego oraz ciepłowodnego zachodzi fermentacja substancji pektynowych pod wpływem bakterii (*Bacillus amylobacter*, *Bacillus felsineus*, *Granulobacter pectinovorum*, *Clostridium felsineum*, *Bacillus comesii rossi*), powodując oddzielenie zdrewniałych części łodygi od włókien oraz podzielenie tasemek sklejonego pektynami i ligniną włókien w warunkach tlenowych oraz beztlenowych. Włókno pochodzące z roszenia wodnego charakteryzuje się jasną barwą oraz miękkim chwytem, jest dobrze podzielone, charakteryzuje się niską masą liniową i wysokimi parametrami

mechanicznymi. Negatywną cechą jest zanieczyszczenie środowiska: gleby, wód i powietrza. W celu stworzenia optymalnego środowiska dla rozwoju mikroorganizmów, przyspieszenia procesu roszenia oraz uzyskania większej podzielności włókna prowadzono badania z dodaniem do kąpieli wodnej pożywek azotowych, zaczynów (Różańska 2020) wykonywano podwójne roszenie, recyrkulację płynu, dodawano do kąpieli wodnej podściółkę z targanu roszonogo lub enzymy (Kozłowski i in. 2006). Aktualnie, roszenie wodne stosuje się w Europie tylko w skali laboratoryjnej. Aspekty ekologiczne miały znaczący wpływ na zaniechanie stosowania tej metody w zakresie przemysłowym. Ścieki poroszeniowe charakteryzowały się zawartością lotnych kwasów tłuszczowych (kwas octowy, masłowy, propionowy, mrówkowy, walerianowy) oraz produktów rozpadu białek, które osiągały wysokie chemiczne (ChZT) oraz biochemiczne (BZT_n) zapotrzebowanie na tlen (Słuchocka 1962).

Roszenie na polu jest najbardziej rozpowszechnioną metodą pozyskania włókna łykowego, która daje możliwość stosowania przemysłowego. Cechuje się rozwojem grzybów saprofitycznych (*Cladosporium herbarum*, *Mucor pumbeus*, *Rhizopus nigricans*) oraz bakterii (*Bacillus mesentericus*, *Bacillus asterosporus*, *Bacterium coli*) na łodygach (Strażyński i in. 2017). W Europie, proces roszenia lnu na polu trwa 28–41 dni, w zależności od panujących warunków atmosferycznych (Kozłowski 1992). Rozłożone łodygi lnu, które znajdują się w górnej warstwie pokładu słomy będą bardziej nawilżone w dni deszczowe. Natomiast, w dni bez opadów oraz rosy słoma, która znajduje się w dolnej warstwie rozścielonego lnu będzie bardziej wilgotna. Z tego względu, w połowie procesu roszenia konieczne jest odwrócenie wyścielonej słomy ze względu na to, by zminimalizować różnice w stopniu wyroszenia łodyg (Strażyński i in. 2017). Optymalna temperatura powietrza podczas procesu siania lnu na polu powinna wynosić 15–20°C, a wilgotność względna powietrza osiągać wartość ok. 60% (Kozłowski 1992). Nieprzewidywalne warunki pogodowe są przyczyną konieczności dokładnego monitorowania procesu roszenia metodą siania lnu na polu. Duże doświadczenie plantatora w tym zakresie jest niezbędne w celu subiektywnej oceny stopnia wyroszenia lnu. Za krótki lub za długi czas roszenia słomy wpływa negatywnie na jakość włókien.

Wybór miejsca w którym słoma lniana będzie rozścielona jest bardzo istotny. Teren musi być równomierny, bez zagłębień w których może utrzymywać się woda oraz nie powinien być ocieniony przez drzewa. Najbardziej pożądaną lokalizacją jest łąka, na której często występują mgły i rosa w okresie jesiennym. Rosnące rośliny powinny być nisko skoszone, a zanieczyszczenia usunięte. Unika się miejsc na których występuje koniczyna, która przerasta wyścielony len, powodując niejednorodny stopień wyroszenia oraz konieczność częstego odwracania słomy (Strażyński i in. 2017).

Proces rośnięcia metodą ślania na polu można przyspieszyć w wyniku stosowania nawozów azotowych, łamania słomy w części korzeniowej lub stosowania desykantów. Pożywki azotowe przyspieszają rozwój mikroflory na łodygach. Desykacja polega na użyciu herbicydów przed zbiorem lnu, powodując przyspieszenie dojrzewania rośliny, jednocześnie potęgując proces rośnięcia. Należy pamiętać, że stosowanie środków chemicznych pomimo selektywnego rozwoju mikroflory może wpływać negatywnie na jakość procesu rośnięcia oraz prowadzić do skażenia środowiska (Róžańska 2020).

1.3.3. Odklejanie chemiczne włókien lnianych

Chemiczne odklejanie włókien od zdrewniałych części rośliny charakteryzuje się oddziaływaniem środków chemicznych takich jak: acetylen, kwas octowy, chloryn sodu, woda utleniona, węglan sodu lub innych bez współdziałania mikroorganizmów. Zachodzące reakcje skracają proces odklejania do kilku godzin. Istnieje ryzyko uszkodzenia włókien, w następstwie czego otrzymuje się włókna o gorszych jakościowo parametrach np. niższej wytrzymałości właściwej. Metoda odklejania chemicznego włókien wpływa negatywnie na środowisko, a wysoki koszt odczynników chemicznych oraz wymagania w postaci zakupu odpowiednich urządzeń, ograniczają stosowanie tego rozwiązania tylko w zakresie eksperymentalnym (Róžańska 2020).

1.3.4. Odklejanie enzymatyczne włókien lnianych

Enzymy są naturalnymi biokatalizatorami, które wpływają na katalizę rozkładu oraz syntezę związków chemicznych. Metody enzymatycznego odklejania

włókien od zdrewniałych części roślin lnu charakteryzują się wysoką selektywnością oraz łagodnymi warunkami procesu (temperatura, pH, wilgotność) bez użycia środków chemicznych. Głównymi enzymami, które odgrywają zasadniczą rolę w ekstrakcji włókien naturalnych są pektynazy, hemicelulazy (głównie ksylanazy) oraz celulazy (Marek i in. 2008). Uważny wybór gotowych mieszanin enzymów, które zostały opracowane specjalnie do enzymatycznej ekstrakcji włókien lnianych oraz dobranie odpowiednich dawek ma kluczowe znaczenie dla uzyskania wydajnego procesu (De Prez i in. 2018). Zastosowanie danych enzymów ma na celu zwiększenie szybkości oraz równomierności odklejania włókien, a także uzyskania ich lepszej podzielności (Kozłowski i Róžańska 2020). Enzymy skutecznie usuwają higroskopijny materiał pektynowy i hemicelulozowy, dostarczając zwiększoną jednorodność powierzchni włókien o lepszych właściwościach termicznych (George i in. 2014). Powszechnie używa się enzymów jako dodatek do kąpieli wodnej. Akin i inni przedstawili metodę w której wykorzystali roszenie enzymatyczne w sprayu, chcąc zmniejszyć zużycie enzymów. W celu osiągnięcia większej penetracji danego preparatu enzymatycznego, słomę lnianą poddano prasowaniu. Do wodnego roztworu enzymu dodano związek chelatujący, którego zadaniem była poprawa skuteczności enzymatycznej. Roztwór rozpylono na słomę lnianą, a następnie inkubowano przez kilka godzin w warunkach wysokiej wilgotności (Akin i in. 2000). Obróbka enzymatyczna włókien łykowych może być wykorzystana do poprawy zarówno właściwości powierzchniowych, jak i termicznych w celu późniejszych modyfikacji z przeznaczeniem na udział np. w materiałach kompozytowych (George i in. 2014).

1.3.5. Metody fizyczne pozyskania włókien lnianych

Istnieją metody fizyczne, które wykorzystuje się w procesie odklejania włókien łykowych, poprzez działanie m.in. ultradźwięków, uderzenia parowego, elektroosmozy lub osmozy na słomę lnianą (Róžańska 2020).

Metoda parowa polega na hydrolizie substancji pektynowych w łodydze. Słomę moczoną w wodzie przez ok. 30 min poddaje się parowaniu w autoklawie. Hydroliza wpływa na pękanie połączeń między wiązkami łyka, a zdrewniałymi częściami rośliny, umożliwiając łatwe oddzielenie włókien od łodygi. Metoda daje

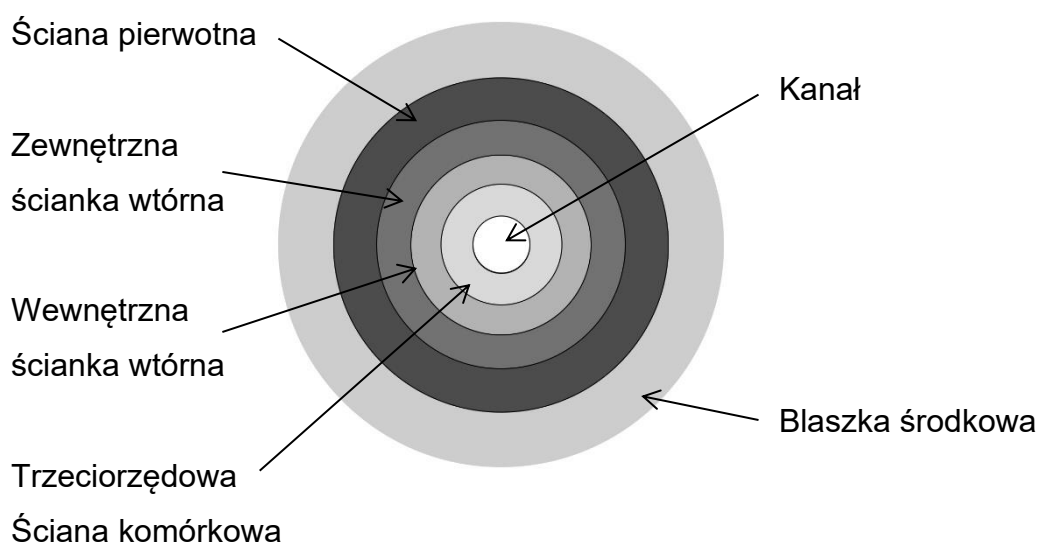
możliwość kontrolowania procesu rosznienia oraz otrzymania włókien z przeznaczeniem na wyroby tekstylne oraz techniczne. Przędze mieszankowe zawierające włókna otrzymane tą metodą wykazują lepszą równomierność w porównaniu do przędz mieszankowych zawierające len kotonizowany (Kessler i in. 1998).

Sirghie i in. opisali korzystny wpływ enzymatycznego odklejania włókien lnianych, wykorzystując dodatkowo ultradźwięki w dyfuzji enzymów, a także ich wpływ na substrat. Enzymy charakteryzują się małą prędkością dyfuzji, a ich działania skupione jest na włóknach zewnętrznych. Ultradźwięki są sposobem na poprawę dyfuzji enzymów do wnętrza włókien technicznych w celu uzyskania lepszej podzielności włókien elementarnych (Sirghie i in. 2015).

Naukowcy z Instytutu Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich PIB w Poznaniu opracowali metodę ekstrakcji włókien na podstawie zjawiska dyfuzji i osmozy, które zachodzą wewnątrz rośliny łykowej w kontakcie z wodą. Odklejanie włókna odbywa się w warunkach kontrolowanych. Woda o stałej temperaturze przepływa ze stałym natężeniem przez słomę w specjalnym reaktorze przez ok. 72 h (Róžańska 2020). Konczewicz i Wojtysiak udowodnili, że przepływ wzdłużny cieczy przez słomę lnianą pozwala uzyskać lepszą jakość włókna, które odznacza się niższą masą liniową oraz lepszą wytrzymałością właściwą w porównaniu do przepływu poprzecznego przez słomę lub w stosunku do włókna uzyskanego metodą ciepłowodnego rosznienia w basenie (Konczewicz i Wojtysiak 2015).

1.4. Charakterystyka włókien lnianych

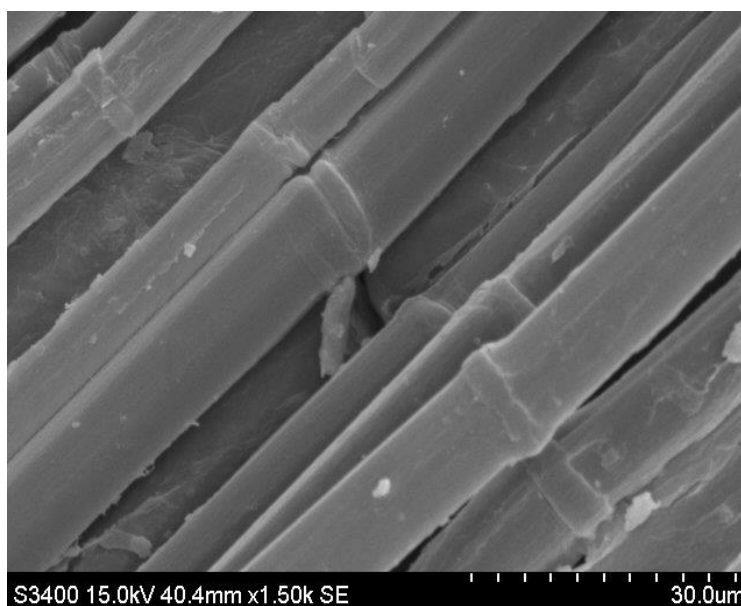
Elementarne włókno lnu charakteryzuje się zwężonymi, ostro zakończonymi końcami, które nadają mu wrzecionowaty kształt. Grube ścianki komórkowe otaczają kanał wewnętrzny, który ma charakter nieciągły, oznacza to, że nie występuje na całej długości włókna. Kanał wewnętrzny zajmuje niewielką powierzchnię lub jest niewidoczny (Jeziorny i Lipp-Symonowicz 1980). Schemat budowy elementarnego włókna lnu przedstawiono na rysunku 8.



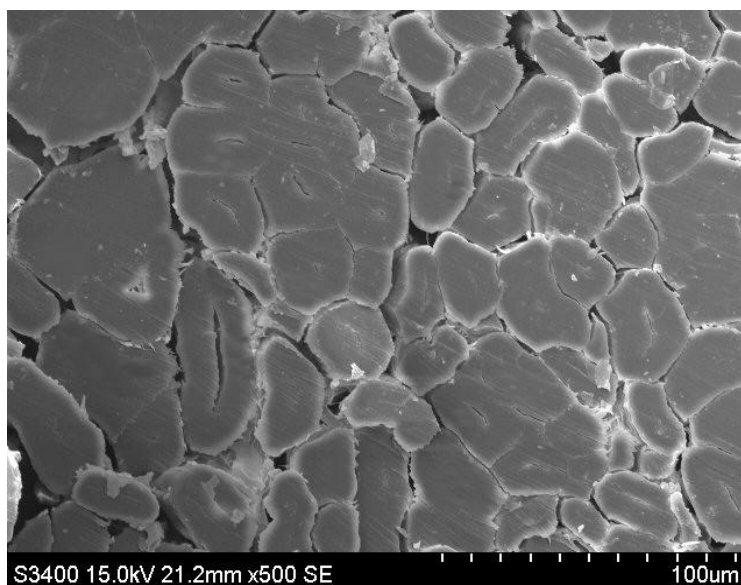
Rys. 8. Schemat budowy elementarnego włókna lnu w przekroju poprzecznym
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Nykter 2006)

Pochodzenie naturalne tego surowca jest przyczyną dużego zróżnicowania jego parametrów jakościowych. Włókna elementarne cechują się długością w przedziale 17–20 mm, a ich grubość wynosi 12–20 μm . Połączone są wzajemnie ze sobą substancją pektynową tworząc zespół włókien określany jako włókno techniczne (Jeziorny i Lipp-Symonowicz 1980), które charakteryzują się długością 200–1400 mm i grubością 200–300 μm (Urbańczyk 1985). W obrazie mikroskopowym (rys. 9, rys. 10), włókno lnu w widoku wzdłużnym cechuje się cylindrycznym kształtem. W większości przypadków, jego powierzchnia jest gładka,

gdzie można zaobserwować podłużne szczeliny lub szpary. Istotną cechą, która pozwala zidentyfikować włókna łykowe są poprzecznie oraz ukośnie występujące pęknięcia, które nazywane są węzłami lub kolankami. Włókna lniane w przekroju poprzecznym charakteryzują się kształtem nieforemnych wielokątów o różnej wielkości (Jeziorny i Lipp-Symonowicz 1980).



Rys. 9. Mikrofotografia widoków wzdłużnych włókien lnianych
Źródło: (Kicińska-Jakubowska 2022)



Rys. 10. Mikrofotografia przekrojów poprzecznych włókien lnianych
Źródło: (Kicińska-Jakubowska 2022)

Specyficzne właściwości włókien lnianych determinują ich dalsze zastosowanie. Wysoka wytrzymałość oraz niska odkształcalność przy działaniu sił rozciągających umożliwia wykorzystanie lnu w produkcji nici technicznych, lin lub sznurków. Wysoka higroskopijność (wilgotność normalna ok. 10%), retencja wody suchej masy włókna na poziomie 50–55% oraz spęcznienie sorpcyjne ok. 47% w kierunku poprzecznym włókna sprawiają, że wykorzystuje się len w produkcji np. płócien żaglowych lub tkanin brezentowych, charakteryzujących się wysoką odpornością na ścieranie i rozrywanie (Urbańczyk 1985). Gładka powierzchnia włókien oraz chłodny chwyt sprawiają, że len jest idealnym materiałem na odzież letnią. W ostatnich latach wykazano, że włókna lniane wykazują duży potencjał jako zamiennik włókien bazaltowych i szklanych w wzmocnieniach materiałów kompozytowych, ze względu na właściwości ekonomiczne, techniczne oraz środowiskowe (Yan i in. 2017).

1.4.1. Skład chemiczny włókien lnianych

Włókna lniane składają się w ok. 60–70% z celulozy. Pozostałe substancje to w ok. 17% hemiceluloza, 10% pektyny, 2–3% lignina oraz 2% woski i tłuszcze (Smole i in. 2013). Zawartość wymienionych składników różni się w zależności od odmiany, warunków uprawy, terminu zbioru oraz sposobu roszczenia lnu (Huo i in. 2013). Odpowiednie usunięcie z włókien składników współwystępujących z celulozą decyduje o dalszym zastosowaniu surowca w przemyśle włókienniczym (Zimniewska i in. 2018).

Celuloza to liniowy polimer β -1,4-glukozy, o dużej masie cząsteczkowej, którego łańcuch monomerów nazywany jest mikrofibrą. W ścianie komórkowej celuloza występuje w dwóch konformacjach: amorficznej oraz krystalicznej (Park i in. 2010). Wyróżnia się cztery podstawowe odmiany polimorficzne celulozy: I, II, III oraz IV w zależności od rozmiaru komórek elementarnych, przynależności do grupy krystalograficznej, układu wiązań wodorowych oraz orientacji łańcuchów. Ponadto, wyszczególnia się podgrupy: I α , I β , III α , III β , IV α oraz IV β (Klemm i in. 2004; O'Sullivan 1997). Celuloza I, tzw. celuloza natywna występuje najczęściej w przyrodzie. Charakteryzuje się niższą trwałością termodynamiczną w porównaniu do celulozy I α , która jest metastabilna. W procesie obróbki wysokotemperatorem celulozy I α

otrzymuje się celulozę I_B, która wyróżnia się większą stabilnością termodynamiczną. Celulozę II, tzw. regenerowaną, otrzymuje się metodą merceryzacji lub regeneracji. Merceryzacja polega na poddaniu celulozy natywnej działaniu stężonego odczynnika alkalicznego, a regeneracja na rozpuszczeniu celulozy natywnej w odpowiednim rozpuszczalniku, a kolejno strąceniu (Grząbka-Zasadzińska 2017). Przekształcenie celulozy I w celulozę II jest nieodwracalnym procesem (Wertz i in. 2010). Celuloza III_I oraz III_{II} są uzyskiwane w odwracalnym procesie z celulozy I oraz II z wykorzystaniem aminy lub ciekłego azotu (French i Johnson 2007). Celulozę IV_I oraz IV_{II} otrzymuje się poprzez zastosowanie obróbki wysokotemperaturowej celulozy III_I oraz III_{II} (Klemm i in. 2004). Stosunek powierzchni krystalicznych w całej strukturze nazywany jest wskaźnikiem krystaliczności i określa również właściwości fizyczne i mechaniczne włókna. Ściany komórkowe włókien elementarnych składają się z silnie zorientowanych mikrofibryli celulozowych o wysokim stopniu polimeryzacji (6000–10000) i krystaliczności (55–75%) (De Prez i in. 2018). Pozostałe składniki niecelulozowe są amorficznymi polimerami, które zmniejszają wytrzymałość oraz moduł sprężystości włókien (Huo i in. 2013).

Hemiceluloza składa się z polisacharydów składających się z połączenia cukrów furanozy i piranozy, takich jak glukoza, mannoza, ksyloza, galaktoza, ramnoza i arabinoza. W porównaniu do krystalicznej celulozy, hemiceluloza jest rozgałęzionym polisacharydem wykazująca różne łańcuchy boczne, co skutkuje niekrystaliczną strukturą. Hemiceluloza charakteryzuje się wysoką hydrofilowością (De Prez i in. 2018).

Pektyny to polisacharydy o złożonej, rozgałęzionej strukturze, zapewniające roślinie elastyczność (De Prez i in. 2018). Ponadto, sklejają włókna w pęczki oraz odpowiadają za ich połysk oraz chwyt. Rośliny włókniste charakteryzują się zawartością pektyn rozpuszczalnych oraz nierozpuszczalnych w wodzie. Techniczne włókno lniane zbudowane jest z komórek połączonych między sobą płytką środkową, składającą się w większości z nierozpuszczalnych w wodzie pektyn. Natomiast, pektyny rozpuszczalne sklejają wiązki włókien w warstwie łyka z otaczającymi je tkankami. Podczas rośnięcia następuje degradacja pektyn rozpuszczalnych w wodzie pod wpływem działania bakterii oraz grzybów. Pektyny, które nie ulegają rozpuszczeniu, pozostają we włóknie determinując jego spoistość.

Całkowite usunięcie pektyn powoduje rozpad pęczków włókien na włókna elementarne (Róžańska 2020).

Lignina jest złożoną, hydrofobową, trójwymiarową siecią aromatyczną, która składa się z jednostek p-hydroksyfenylopropanu. Wyróżnia się strukturą amorficzną oraz wpływa na sztywność rośliny (De Prez i in. 2018). We włóknie elementarnym występuje w ścianie pierwotnej oraz zewnętrznej części ścianki wtórnej (Róžańska 2020). W skład lignin wchodzi m.in. kwasy fenolowe, które występują w formie związanej w postaci estrów oraz glikozydów (Golonko i in, 2015). Wzrost zawartości lignin we włóknach wpływa negatywnie na ich jakość, powodując obniżenie wytrzymałości właściwej, sprężystości oraz zmniejszenie podzielności włókien (Róžańska 2020).

Zawartość wosków oraz tłuszczów we włóknie wpływa na obniżenie współczynnika tarcia, umożliwiając łatwiejsze przesuwanie włókien podczas przerobu technologicznego (Róžańska 2020).

1.5. Właściwości prozdrowotne włókien Inianych

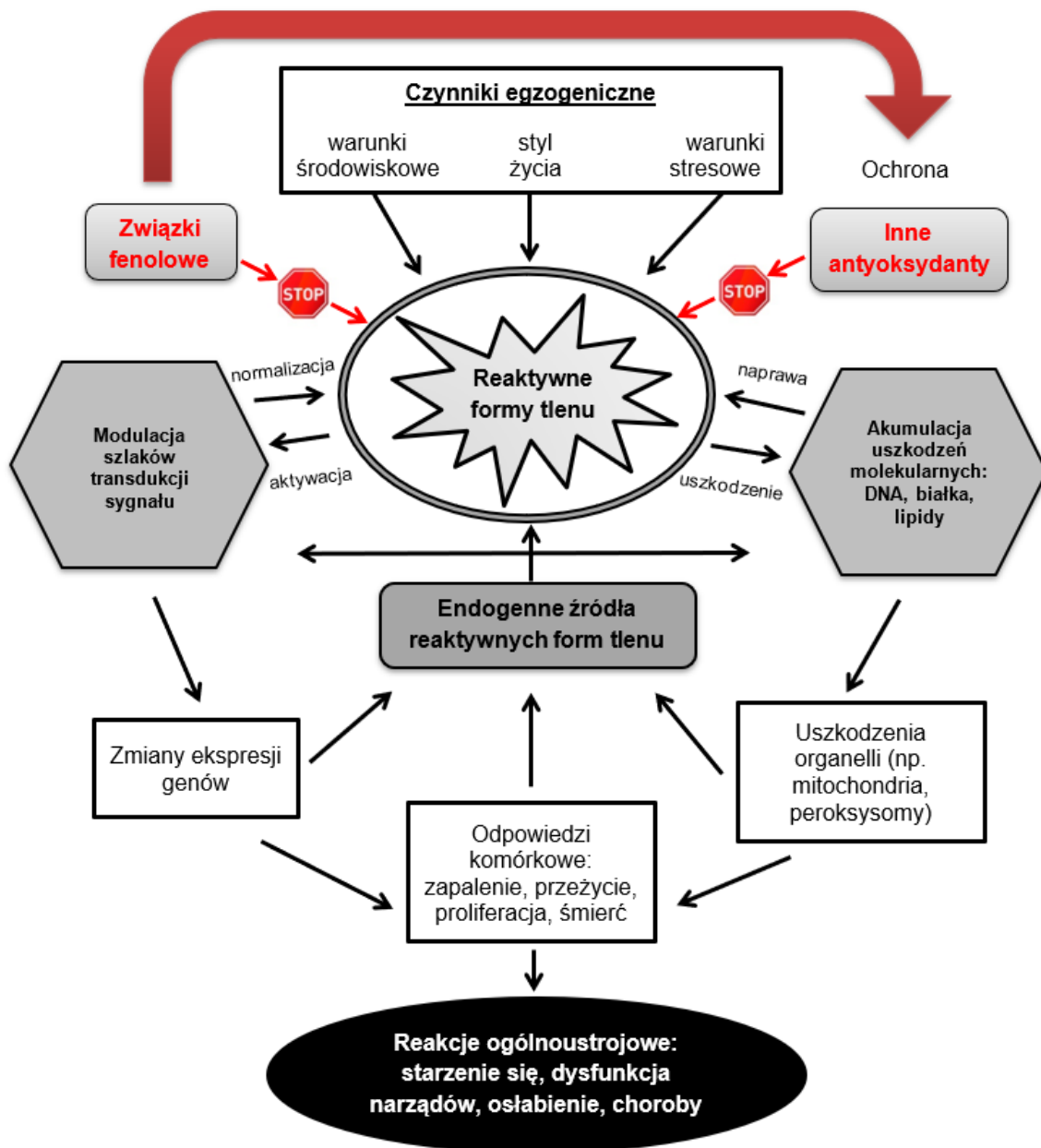
Odzież codzienna ochrania ciało człowieka przed czynnikami zewnętrznymi, zapewnia funkcję izolacyjną przed zimnem lub chłodem, a podczas upałów odprowadza wilgoć. Ponadto powinna spełniać wymagania estetyczne i służyć jako wyraz indywidualności w danej kulturze. Wybór odpowiedniego rodzaju, rozmiaru oraz surowca zapewnia komfort użytkowania umożliwiając swobodę ruchów oraz minimalizując dyskomfort związany z niewłaściwie dobraną odzieżą.

Osoby z problemami dermatologicznymi lub zmagające się z skórными reakcjami alergicznymi powinny unikać odzieży wykonanej z włókien syntetycznych, a wybierać wyprodukowaną z włókien naturalnych, która charakteryzuje się wysoką higroskopijnością, przepuszczalnością powietrza oraz nie wykazuje zdolności do gromadzenia ładunków elektrostatycznych na powierzchni. W ostatnich latach odzież Iniana cieszy się popularnością ze względu na komfort i pozytywne oddziaływanie na skórę użytkownika. Przyjazny dla skóry materiał nie powoduje podrażnień, a właściwości hipoalergiczne sprawiają, że zalecana jest osobom, które cierpią na choroby skóry takie jak np. łuszczyca, atopowe zapalenie skóry lub egzema. Włókna Iniane znane są jako surowce włókiennicze o właściwościach prozdrowotnych, które wyróżniają się naturalnymi właściwościami antybakteryjnymi oraz antyoksydacyjnymi. Len, jako surowiec pochodzenia naturalnego, jest biodegradowalny i nie zanieczyszcza środowiska.

1.5.1. Aktywność biologiczna włókien Inianych

Włókna Iniane charakteryzują się aktywnością biologiczną, co oznacza, że oddziałują na organizm człowieka podczas użytkowania. Zimniewska i in. zbadali aktywność antyoksydacyjną włókien łykowych w zależności od odmiany rośliny, metody ekstrakcji włókien oraz od kolejnych etapów wstępnej obróbki surowca. Porównując włókna łykowe pozyskane różnymi metodami włókna dekortykowane wykazują najwyższą aktywność przeciwutleniającą. Wysoką aktywnością antyoksydacyjną charakteryzują się również włókna roszone na polu, podczas gdy włókna pozyskane ze słomy z wykorzystaniem roszenia wodnego nie wykazują

aktywności biologicznej (Zimniewska 2015; Zimniewska i in. 2018). Aktywność antyoksydacyjna to zdolność do neutralizowania wolnych rodników, które mogą powstawać w organizmie w wyniku redukcji cząsteczki tlenu do cząsteczki wody w reakcjach dwuelektronowych oraz na drodze procesu jednoelektronowego (Czajka 2006). Tlen jest ważnym pierwiastkiem dla każdego żywego organizmu. Reaktywne formy tlenu, które obejmują nadtlenek, tlen singletowy, nadtlenek wodoru i rodnik hydroksylowy, mogą być toksyczne i mutagenne (Działo i in. 2016). Cząsteczki te charakteryzują się zdolnością do niezależnej egzystencji. Wyróżniają się zawartością co najmniej jednego atomu tlenu oraz jednym lub więcej niesparowanym elektronem. Wysoka reaktywność oraz wchodzenie w reakcje chemiczne z komórkami jest niekorzystne metabolicznie (Czajka 2006). Naturalny mechanizm obronny człowieka zwalcza je regularnie, natomiast czynniki zewnętrzne, takie jak promieniowanie UV, zanieczyszczenia środowiska oraz spożywanie niezdrowego jedzenia lub alkoholu mogą potęgować ich przyrost. Nadmierna ilość wolnych rodników prowadzi do występowania tzw. stresu oksydacyjnego, powodując niekorzystne zmiany w strukturze kwasów nukleinowych, białek i lipidów, w wyniku czego dochodzi do uszkodzeń i szybszego starzenia się komórek człowieka. Ponadto, stres oksydacyjny wpływa na rozwój m.in. chorób cywilizacyjnych, do których zalicza się schorzenia układu sercowo-naczyniowego, choroby nowotworowe, cukrzycę, osteoporozę, schorzenia neurodegeneracyjne i inne (Muzykiewicz i in. 2019). Schemat czynników i mechanizmów biorących udział w powstawaniu wolnych rodników i komórkowej odpowiedzi na reaktywne formy tlenu przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Schemat czynników i mechanizmów biorących udział w powstawaniu wolnych rodników i komórkowej odpowiedzi na reaktywne formy tlenu
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Dziąło i in. 2016)

Związki fenolowe określa się jako substancje bioaktywne, do których zalicza się m.in. flawonoidy, kwasy fenolowe oraz taniny (Parus 2013). Flawonoidy to najbardziej popularna oraz złożona grupa polifenoli pochodzenia roślinnego. Aktywne właściwości antyoksydacyjne powodują wzrost zainteresowania tymi substancjami, które zapewniają potencjalne korzyści zdrowotne. Flawonoidy są syntezowane przez rośliny w warunkach stresów biotycznych. Do ich funkcji należy

m.in. zwalczanie stresu oksydacyjnego oraz regulacja wzrostu roślin (Kałwa 2019). W roślinach, kwasy fenolowe wchodzą w skład lignin i tanin, które występują w formie związanej w postaci estrów i glikozydów (Parus 2013). W warunkach wyższej temperatury, w środowisku kwaśnym związki mogą ulegać hydrolizie powodując zerwanie wiązań estrowych oraz glikozydowych (Jeszka i in. 2010). Wyróżnia się dwa rodzaje kwasów fenolowych: kwas hydroksybenzoesowy oraz hydroksycynamonowy. Do najbardziej popularnych pochodnych kwasu hydroksybenzoesowy należą kwasy: galusowy, *p*-hydroksybenzoesowy, protokatechowy, wanilinowy i syryngowy, natomiast kwasu hydroksycynamonowego: kawowy, ferulowy, *p*-kumarowy i synapowy (Shamanin i in. 2022). Badania wskazują, że pochodne kwasu cynamonowego są efektywniejszymi przeciwutleniaczami od pochodnych kwasu benzoowego (Mitek i Gasik 2007).

Zimniewska wykazała silne relacje między aktywnością antyoksydacyjną, a zawartością kwasów fenolowych we włóknach lnianych. Badania dowiodły istotnie statystycznie zależności pomiędzy zawartością lignin we włóknie oraz kwasu ferulowego i *p*-kumarowego. Włókna charakteryzujące się najwyższymi zawartościami tych składników wykazywały najwyższą aktywność antyoksydacyjną. Sposób roszczenia włókien lnianych wpływa na zawartość kwasów fenolowych. Wśród metod biologicznych roszczenia słomy lnianej, wybór wodnego roszczenia, w porównaniu ze słaniem na polu, powoduje usuwanie z włókien substancji fenolowych, które są częściowo rozpuszczalne w wodzie (Zimniewska 2015).

System obrony przeciwutleniającej można podzielić na trzy etapy. W pierwszym etapie, enzymy antyoksydacyjne nie pozwalają na powstawanie nowych wolnych rodników tlenowych. Drugi etap polega na przerywaniu łańcuchowych reakcji wolnorodnikowych. W ostatnim etapie organizm usuwa skutki reakcji reaktywnych form tlenu ze składnikami komórek oraz odtwarza strukturę uszkodzonych cząsteczek (Czajka 2006). Ilość kwasów fenolowych, która jest potrzebna do walki z wolnymi rodnikami zależy od zdolności do ich neutralizacji, gdzie różni się w zależności od rodzaju wolnych rodników, źródła kwasów fenolowych oraz procesu utleniania. Związki neutralizują wolne rodniki poprzez oddawanie atomów wodoru lub elektronów, prowadząc do stabilizacji wolnych rodników oraz zmniejszenia ich reaktywności (Phaniendra i in. 2015). Nie istnieją

badania, które sugerują minimalne spożycie kwasów fenolowych dla optymalnej ochrony przed stresem oksydacyjnym. Uznaje się, że dieta bogata w zawartość kwasów fenolowych może zapewnić wystarczającą ilość antyoksydantów w celu ochrony organizmu.

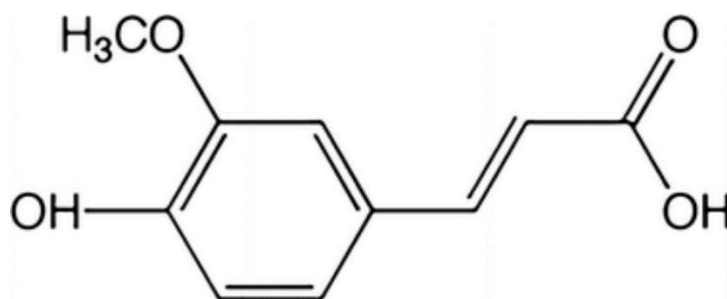
Kwasy fenolowe, w zależności od ich struktury oraz właściwości chemicznych, mogą być w różnym stopniu wchłaniane przez skórę człowieka. Hydrofilowość oraz właściwości lipofilowe umożliwiają przenikanie przez warstwę tłuszczową skóry. Ilość oraz dynamika wchłanianej substancji przez skórę zależy od czynników biologicznych (wiek, stan skóry, metabolizm komórkowy) oraz fizykochemicznych (współczynnik podziału między warstwą rogową naskórka, a nośnikiem, wielkość, struktura przestrzenna oraz polarność cząsteczek). Wchłanianie związku fenolowego zależy od podklasy fenoli, do której dany związek należy, postaci w której występuje (glikozyd lub aglikon) oraz innych składników preparatu, w którym jest dostarczany. Związki fenolowe po wnikięciu do naskórka mogą ulegać reakcjom enzymatycznym lub nieenzymatycznym. Przenikanie aktywnych cząsteczek może odbywać się przez naskórek, komórki, międzykomórkowo, przez pęcherzyki lub przez gruczoły potowe i mieszki włosowe (Działo i in. 2016).

1.5.2. Charakterystyka wybranych kwasów fenolowych

1.5.2.1. Kwas ferulowy

Kwas ferulowy (kwas 4-hydroksy-3-metoksycynamonowy) jest związkiem fenolowym, który cechuje się właściwościami przeciwzapalnymi, przeciwbakteryjnymi, przeciwnowotworowymi, przeciwzakrzepowymi, immunostymulującymi oraz wykazuje działania przeciwcukrzycowe. Znajduje zastosowanie w farmacji, żywności oraz w preparatach do pielęgnacji skóry. Wykazuje zdolność do wiązania i neutralizacji wolnych rodników. Źródłami kwasu ferulowego są nasiona zbóż, szpinak, pietruszka, winogrona, rabarbar i inne (Zduńska i in. 2018).

Charakterystyczna budowa strukturalna kwasu ferulowego może przyczyniać się do zdolności redukcji wolnych rodników. Obecność podstawników, które dostarczają elektrony na pierścieniu benzenowym, dodaje specjalną właściwość w postaci terminacji reakcji łańcuchowych wolnych rodników. Natomiast grupa karboksylowa wraz z podwójnym wiązaniem CC, może służyć jako dodatkowe miejsce do ataku dla wolnych rodników, które zapobiegałoby uszkodzeniu błony komórkowej. Ponadto, może zapewniać pewną ochronę przed peroksydacją lipidów. Obecność podstawników w budowie kwasu ferulowego wzmacnia jego właściwości przeciwutleniające (Kamm 2021). Strukturę kwasu ferulowego przedstawiono na rysunku 12.



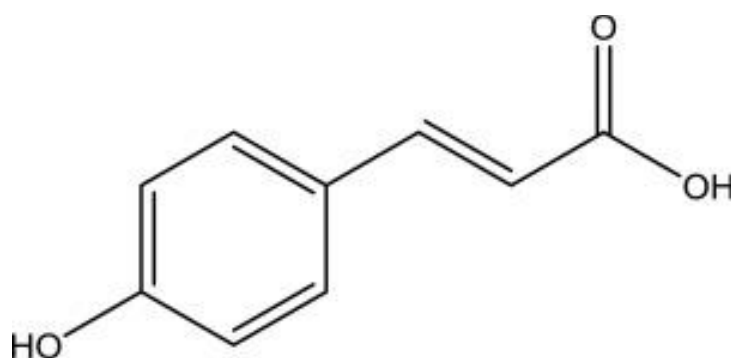
Rys. 12. Struktura kwasu ferulowego
Źródło: (Kamm 2021)

Każdy reaktywny rodnik w kontakcie z kwasem ferulowym bez trudności wyodrębnia atom wodoru, tworząc rodnik fenoksyłowy. Stabilizację tego rodnika zapewnia niesparowany elektron, który oprócz tlenu, może być zdelokalizowany w całej cząsteczce oraz przedłużone sprzężanie w nienasyconym łańcuchu bocznym, co odpowiada za efektywny potencjał antyoksydacyjny kwasu ferulowego (Kamm 2021).

1.5.2.2. Kwas *p*-kumarowy

Kwas kumarowy jest organicznym związkiem chemicznym z grupy kwasów fenolowych. W zależności od położenia grupy hydroksylowej, wyróżnia się trzy izomery: *orto*, *meta* i *para*, gdzie izomer *para* uznaje się jako najbardziej powszechny w przyrodzie. Kwas *p*-kumarowy należy do aromatycznych

hydroksykwasów i jest jednym z ważniejszych składników lignocelulozy, pełniącym rolę kluczowego budulca (Gałązka i in. 2016). Wykorzystuje się go do wielu zastosowań w przemyśle spożywczym, w produkcji leków przeciwbólowych i przeciwzapalnych oraz jako składnik kosmetyków do pielęgnacji skóry. Budowa chemiczna nadaje mu właściwości antyoksydacyjne, którymi się charakteryzuje. Grupa hydroksylowa umożliwia neutralizowanie wolnych rodników, które są szkodliwe dla organizmu (Urbaniak i in. 2012). Badania dowiodły, że kwas kumarowy może chronić komórki przed stresem oksydacyjnym oraz zmniejszać ryzyko uszkodzenia DNA, które może prowadzić do chorób nowotworowych. Hamuje enzymy odpowiedzialne za biotransformację promutagenów w aktywne formy, które są związane z kancerogenezą (Figat i in. 2021). Wyróżnia się zdolnością do zapobiegania peroksydacji lipidów oraz obniżania poziomu cholesterolu we krwi (Zang i in. 2000). Strukturę kwasu *p*-kumarowego przedstawiono na rysunku 13.

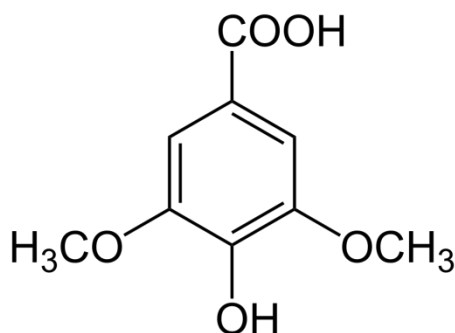


Rys. 13. Struktura kwasu *p*-kumarowego
Źródło: (Shen i in. 2019)

1.5.2.3. Kwas syryngowy

Kwas syryngowy jest organicznym związkiem chemicznym, który jest pochodną kwasu galusowego. Szeroki zakres zastosowań terapeutycznych w profilaktyce m.in. cukrzycy, chorób sercowo-naczyniowych, nowotworów jest możliwy ze względu na właściwości przeciwutleniające, przeciwdrobnoustrojowe, przeciwzapalne, które wynikają z obecności grup metoksyłowych na pierścieniu aromatycznym. Kwas syryngowy wyróżnia się potencjałem do modulowania aktywności enzymów, dynamiki białek i różnych czynników transkrypcyjnych

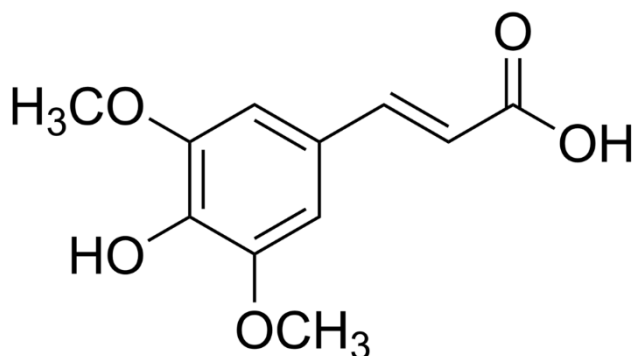
związanych z cukrzycą, stanami zapalnymi, rakiem i angiogenezą. Kwas syringowy jest bardziej aktywny od kwasu synapinowego (Cheemanapalli i in. 2018). Strukturę kwasu syringowego przedstawiono na rysunku 14.



Rys. 14. Struktura kwasu syringowego
Źródło: (Cheemanapalli i in. 2018)

1.5.2.4. Kwas synapinowy

Kwas synapinowy jest organicznym związkiem chemicznym, który jest pochodnym kwasu kumarowego. Zawiera dwie grupy metoksyłowe, gdzie układ podstawników pierścienia aromatycznego jest identyczny jak w przypadku kwasu syringowego. Badania wykazują, że kwas synapinowy poprawia status antyoksydacyjny, a obniżone markery stresu oksydacyjnego w osoczu i tkankach potwierdzają skuteczną zdolność przeciwutleniającą (Nithya i Subramanian 2017). Ponadto kwas synapinowy wykazuje potencjał jako produkt wyjściowy do produkcji filtrów chroniących przez promieniowaniem UV (Peyrot i in. 2020). Strukturę kwasu synapinowego przedstawiono na rysunku 15.



Rys. 15. Struktura kwasu synapinowego
Źródło: Chen 2016

2. CEL PRACY

Celem rozprawy doktorskiej było rozwiązanie problemu badawczego: czy właściwości włókna lnianego zależą od warunków wilgotności gleby w okresie wzrostu roślin, w szczególności od niedoboru wody, identyfikacja w sposób szczegółowy różnic jakościowych włókien lnianych w zależności od poziomu wilgotności gleby podczas okresu wegetacji z uwzględnieniem odmienności poszczególnych odmian lnu oraz określenie poziomu zawartości kwasów fenolowych, aktywności antyoksydacyjnej i struktury krystalicznej włókien.

Hipoteza główna:

Deficyt wody w glebie podczas okresu wzrostu lnu wpływa na jakość włókien lnianych oraz na zawartość substancji aktywnych we włóknie.

Hipotezy szczegółowe:

1. Susza w okresie wegetacji lnu wpływa na wydajność włókna, średnią długość wagową, masę liniową, wskaźniki przy rozciąganiu statycznym oraz na strukturę zewnętrzną włókien lnu.
2. Susza w okresie wegetacji lnu wpływa na skład chemiczny włókien lnianych w szczególności na zawartość lignin oraz substancji woskowych i tłuszczowych.
3. Warunki uprawy roślin lnu, w zakresie wilgotności gleby, wpływają na zawartość kwasów fenolowych we włóknach, a tym samym na ich aktywność antyoksydacyjną.
4. Susza podczas okresu wegetacji roślin lnu wpływa na stopień krystaliczności włókien.
5. Susza wpływa na jakość włókien lnianych w zależności od odmiany lnu.

3. CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Część eksperymentalna pracy opierała się na pozyskaniu włókna lnianego z roślin pochodzących ze ściśle zaplanowanego, trzyletniego doświadczenia wazonowego, w którym w sposób kontrolowany ograniczono roślinom dostępność wody w podłożu tworząc tzw. stres suszy. Eksperyment prowadzono na trzech odmianach lnu włóknistego (*Linum usitatissimum* L.): Artemida, Modran oraz Sara. Odmiany te są powszechnie uprawiane w Polsce, dlatego zostały wytypowane do badań. Ze słomy lnianej każdej odmiany pozyskano włókno, które poddano ocenie jakościowej oraz analizie zawartości substancji aktywnych.

3.1. Warunki prowadzenia eksperymentu

Doświadczenie wazonowe przeprowadzono w hali wegetacyjnej Zakładu Doświadczalnego Instytutu Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich – Państwowego Instytutu Badawczego w Pętkowie (52°12'40"N, 17°15'31"E) w latach 2019, 2020 oraz 2021. W każdym roku zastosowano tożsame metody prowadzenia doświadczenia oraz kontrolowano zmienne parametry. Przedmiotem doświadczenia były odmiany lnu włóknistego z kolekcji IWNIRZ PIB oraz połowa pojemność wodna (PPW) gleby.

Eksperyment założono w 36 emaliowanych wazonach (12 szt. wazonów dla każdej odmiany) o wysokości 20 cm i średnicy 22 cm z wkładkami odpowietrzającymi z plastiku. Wazon-y wytarowano do stałej wagi (2,1 kg), następnie napełniono glebą (9,0 kg) pobraną z pola uprawnego z zachowaniem prawidłowego płodozmianu dla uprawy lnu (7-letnia przerwa w uprawie lnu). Nasiona, pochodzące z kwalifikowanego materiału siewnego, wysiewano punktowo (50 szt./wazon) na głębokości 1 cm (rys. 16). Po siewie, powierzchnię gleby przykryto warstwą piasku kwarcowego (0,3 kg) o granulacji 0,1–0,5 mm w celu ochrony przed nadmiernym wysuszeniem i zaskorupieniem gleby. W dniu założenia doświadczenia, pobrano próbki gleby w celu określenia wilgotności, połowej pojemności wodnej metodą Wanschatego, próchnicy, pH, zawartości makro i mikro elementów, składu granulometrycznego oraz gatunku. Po wyrównaniu wschodów, gdy rośliny osiągnęły wysokość ok. 5–6 cm

(skala BBCH: 11) dokonano przerywania roślin do liczby 30 szt./wazon pozostawiając zdrowe i wyrównanie rośliny.



Rys. 16. Wazony Iniane po siewie. Pierwszy dzień doświadczenia – 23.04.2020r.
Źródło: prace własne, fot. E. Kwiatkowska

Po siewie, do rozpoczęcia fazy szybkiego wzrostu tj. osiągnięcia przez rośliny wysokości ok. 18–20 cm (skala BBCH: 32) wilgotność gleby utrzymywano na poziomie 45% PPW, który jest optymalny do prawidłowego rozwoju roślin (rys. 17).

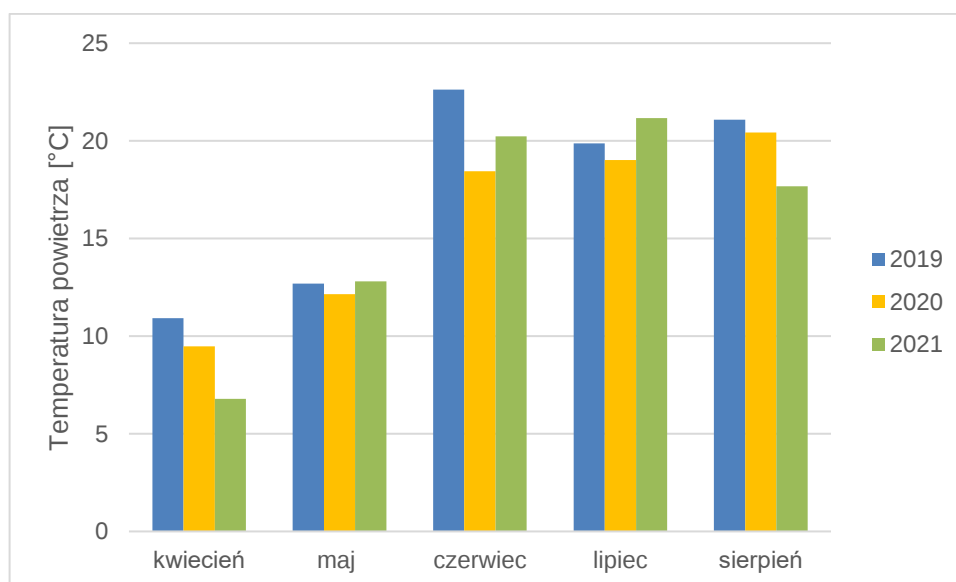


Rys. 17. Rośliny Inu, 37 dzień wzrostu – 29.05.2019r.
Źródło: prace własne, fot. E. Kwiatkowska

Wraz z rozpoczęciem fazy szybkiego wzrostu (skala BBCH: 32) dla każdej odmiany Inu zastosowano:

- w 4 wazonach kontrolowany deficyt wody na poziomie 25% PPW,
- w 4 wazonach kontrolowany deficyt wody na poziomie 35% PPW,
- w 4 wazonach utrzymywano poziom wilgotności na optymalnym poziomie 45% PPW (kontrola).

Woda w wazonach była codziennie uzupełniana metodą wagową na podstawie określonej wilgotności gleby oraz polowej pojemności wodnej metodą Wanschatego przez gleboznawcę. Hala wegetacyjna była codziennie wietrzona, dlatego przyjęto średnią temperaturę powietrza równą temperaturze panującej na zewnątrz (rys. 18). Dane pomiarowe średniej, dobowej temperatury powietrza pozyskano z Centralnego Ośrodka Badania Odmian Roślin Uprawnych w Słupi Wielkiej (52°13'02"N, 17°13'04"E). Stacja meteorologiczna znajdowała się ok. 4 km od założonego doświadczenia. Średnia dobowo temperatura w całym okresie wegetacji Inu w danych latach wynosiła w 2019r. 18,2°C, w 2020r. 16,4°C, a w 2021r. również 16,4°C.



Rys. 18. Średnia dobowo temperatura powietrza w miesiącach wegetacji Inu w latach 2019–2021 w miejscowości Słupia Wielka

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Centralnego Ośrodka Badań Odmian Roślin Uprawnych w Słupi Wielkiej

Pod koniec fazy wzrostu lnu zauważono różnice w wysokości roślin, które były spowodowane deficytem wody w podłożu (rys. 19). Pomimo różnego okresu wegetacji wybranych odmian lnu, liczbę dni od siewu do zbioru ujednolicono w danym roku w celu uniknięcia zróżnicowania wyników. Cykl wzrostu lnu od momentu siewu do zbioru w 2019r. wynosił 104 dni, w 2020r. 106 dni, a w 2021r. 102 dni (tabela 6). Rozbieżność liczby dni w danych latach wynikała z oceny roślin pod względem osiągnięcia fazy zielono-żółtej roślin rekomendowanej do zbioru lnu z przeznaczeniem na włókno.



Rys. 19. Rośliny lnu poddane stresowi suszy, 73 dzień wzrostu – 05.07.2019r.

Źródło: prace własne, fot. E. Kwiatkowska

Tabela 6. Terminy siewu lnu, zbioru oraz roszenia słomy lnianej w latach 2019–2021

Rok	Data siewu lnu	Data zbioru słomy lnianej	Liczba dni wegetacji lnu	Początek roszenia słomy lnianej	Koniec roszenia słomy lnianej	Liczba dni roszenia słomy lnianej
2019	23.04.2019r.	05.08.2019r.	104	24.09.2019r.	21.10.2019r.	27
2020	23.04.2020r.	07.08.2020r.	106	10.09.2020r.	01.10.2020r.	21
2021	16.04.2021r.	27.07.2021r.	102	04.10.2021r.	30.10.2021r.	26

Źródło: opracowanie własne

W ramach prowadzonego doświadczenia zastosowano biologiczną metodę roszenia na polu, oczyszczona z ziaren słoma została poddana sianiu na łące (rys. 20). Słomę lnianą dwukrotnie ręcznie odwracano w celu uzyskania odpowiedniego stopnia wyroszenia na podstawie jedynej istniejącej normie, która została wycofana, ale na jej miejsce nie została opracowana nowa: Polska Norma PN-P-04680-10:1980 Metody badań surowców włókienniczych – Słoma lniana roszone – Wyznaczanie stopnia wyroszenia. Proces roszenia uznano za przeprowadzony właściwe w momencie, gdy drewnik w łodydze udało się w łatwy sposób połamać oraz wykruszyć go, a włókno po złamaniu odstawało od niego. W trakcie roszenia lnu, najwyższa, średnia temperatura dobową miała miejsce w 2020r., a najniższa w 2021r. Najwyższe ilości opadów podczas roszenia wystąpiły w 2019r., a najniższe w 2020r (tabela 7). Temperatura powietrza oraz suma opadów deszczu są nieprzewidywalnymi parametrami pogodowymi. Z tego względu liczba dni roszenia słomy lnianej była różna w każdym roku prowadzenia doświadczenia, a o zakończeniu procesu zdecydowano na podstawie wyżej wymienionej normy. Po wyroszeniu poddano słomę mechanicznemu przerobowi na laboratoryjnym urządzeniu międląco-trzepiącym w IWNIIRZ PIB w celu pozyskania włókna. Słoma dobrze wyroszona pozwoliła na uzyskanie włókna mocnego, tasiemkowego i pozbawionego przyschniętych paździerz.



Rys. 20. Słoma lniana poddana procesowi roszenia, 27 dzień roszenia 21.10.2019r.

Źródło: prace własne, fot. E. Kwiatkowska

Tabela 7. Średnia temperatura dobową oraz suma opadów deszczu podczas okresu rośnienia słomy w danym roku

Rok	Średnia temperatura dobową podczas okresu rośnienia słomy [°C]	Suma opadów deszczu podczas okresu rośnienia słomy [mm]
2019r.	11,3	33,2
2020r.	13,8	21,3
2021r.	7,4	23,5

Źródło: opracowanie własne na podstawie (IMGW PIB, [online], [dostęp 10 luty 2022])

3.2. Charakterystyka materiału badawczego

W rolnictwie kluczową rolę odgrywa selekcja odmian roślin, która polega na wybieraniu i rozmnażaniu roślin, w celu pozyskania nowych odmian, które będą łączyć w sobie pożądane cechy, takie jak np. większa wydajność, odporność na choroby i szkodniki, lepsza jakość plonów lub większa odporność na warunki atmosferyczne. Intencją tego procesu jest również otrzymanie odmian, które są bardziej dostosowane do określonych parametrów uprawy, uwzględniając warunki klimatyczne, glebowe oraz topograficzne.

3.2.1. Odmiana Artemida

Odmiana lnu włóknistego Artemida została wpisana do Krajowego Rejestru Odmian w 1996r. Z dniem 1 listopada 2020r. nastąpiło wygaśnięcie przedłużenia okresu wpisu w KR (Centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin Uprawnych [online], [dostęp 19 kwietnia 2023]). Odmiana została wyhodowana poprzez skrzyżowanie odmian: Natasja oraz Tajga (Heller 2012). Pomimo wykreślenia z KR odmiany Artemida, przez wiele lat była uznawana jako wzorzec przez COBORU, do którego porównywano genotypy zgłaszane do badań rejestrowanych. Zastąpienie starych odmian nowymi, które cechują się wyższą wartością gospodarczą, jest naturalnym procesem.

W pewnym okresie czasu, odmiana Artemida była najczęściej uprawianą odmianą lnu włóknistego w Polsce. W 2001r. z terenów województwa lubelskiego wyeksportowano włókna tej odmiany o wartości ok. 1,5 mln USD. Głównymi cechami charakterystycznymi tej odmiany jest wysoka odporność na fuzaryjne więdnienie oraz wyleganie. Artemida wyróżnia się wysoką jakością włókna długiego. Okres wegetacji wynosi 104 dni. (Heller 2012). Wysokość roślin określa się jako średnio-wysokie. Charakteryzuje się niebieską barwą kwiatów, które kwitną w średnim terminie. Torebka nasienna jest średniej wielkości, a nasiona przyjmują brązowy kolor. Masa 1000 nasion określana jest jako mała do średniej. Termin dojrzałości technologicznej oceniany jest jako średni (Strażyński i in. 2017).

3.2.2. Odmiana Modran

Odmiana Inu włóknistego Modran została wpisana do Krajowego Rejestru Odmian w 2001r. Wygaśnięcie wpisu nastąpi wraz z końcem 2031r. (Centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin Uprawnych [online], [dostęp 19 kwietnia 2023]). Odmiana została wyhodowana w Zakładzie Doświadczalnym IWNIRZ PIB w Pętkowie na wskutek skrzyżowania odmian Ariane i Smoleński. Długość okresu wegetacji wynosi 100 dni. Odmiana Modran charakteryzuje się wysoką odpornością na fuzariozę i wyleganie oraz bardzo dobrą jakością włókna długiego (Heller 2012). Wysokość roślin określana jest jako średnia. Len odmiany Modran kwitnie we wczesno-średnim terminie, a kwiaty przyjmują kolor niebiesko-fioletowy. Torebka nasienna osiąga średnią wielkość, a nasiona brązowy kolor. Masa 1000 nasion określana jest jako mała do średniej. Termin dojrzałości technologicznej oceniany jest jako wczesny do średniego (Strażyński i in. 2017).

3.2.3. Odmiana Sara

Odmiana Inu włóknistego Sara została wpisana do Krajowego Rejestru Odmian w 2007r. (Centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin Uprawnych [online], [dostęp 19 kwietnia 2023]). Odmiana została wyhodowana w Zakładzie Doświadczalnym IWNIRZ PIB w Pętkowie. Głównymi cechami charakterystycznymi są: wysoki plon słomy odziarnionej (86,7 dt/ha), plon nasion (9,4 dt/ha), wydajność włókna ok. 22%. Długość okresu wegetacji wynosi 106 dni. Rośliny, w sprzyjających warunkach, osiągają wysokość ok. 75 cm. Odmiana jest odporna na fuzariozę oraz wyleganie oraz cechuje się dobrą jakością włókna długiego (Heller 2012). Wysokość roślin określa się jako średnio-wysokie. Charakteryzuje się niebieską barwą kwiatów, które kwitną w średnio-późnym terminie. Torebka nasienna jest średniej wielkości, a nasiona przyjmują brązowy kolor. Masa 1000 nasion określana jest jako mała do średniej. Termin dojrzałości technologicznej oceniany jest jako średni do późnego (Strażyński i in. 2017).

3.3. Metodyka badań

3.3.1. Analiza jakościowa gleby

Badania analizy jakościowej gleby, w każdym roku doświadczenia, zostały zlecone do wykonania w Okręgowej Stacji Chemiczno-Rolniczej w Poznaniu w celu oceny jej przydatności do uprawy roślin. Analizy tego typu są ważnym narzędziem dla rolników i hodowców, których zadaniem jest utrzymanie lub poprawa jakości gleby oraz zwiększenie plonów. Wykonano oznaczenie pH gleby w roztworze chlorku potasu o stężeniu $c(KCl)=1 \text{ mol/l}$ (pH-KCl) zgodnie z aktualnie wycofaną normą PN-ISO 10390:1997 Jakość gleby – Oznaczanie pH. Ponadto, zbadano zawartość składników przyswajalnych, makroelementów (w mg/100g gleby) na podstawie norm:

- PN-R-04023:1996 Analiza chemiczno-rolnicza gleby – Oznaczanie zawartości przyswajalnego fosforu w glebach mineralnych (norma wycofana, bez zastąpienia),
- PN-R-04022:1996/Az1:2002 Analiza chemiczno-rolnicza gleby – Oznaczanie zawartości przyswajalnego potasu w glebach mineralnych (norma wycofana, bez zastąpienia),
- PN-R-04020:1994/Az1:2004 Analiza chemiczno-rolnicza gleby – Oznaczanie zawartości przyswajalnego magnezu (norma wycofana, bez zastąpienia).

Wykonano badania zawartości składników przyswajalnych, mikroelementów (w mg/kg gleby) zgodnie z normami:

- PN-R-04018:1993 Analiza chemiczno-rolnicza gleby – Oznaczanie zawartości przyswajalnego boru (norma wycofana, bez zastąpienia),
- PN-R-04019:1993 Analiza chemiczno-rolnicza gleby – Oznaczanie zawartości przyswajalnego manganu (norma wycofana, bez zastąpienia),
- PN-R-04017:1992 Analiza chemiczno-rolnicza gleby – Oznaczanie zawartości przyswajalnej miedzi (norma wycofana, bez zastąpienia),
- PN-R-04016:1992 Analiza chemiczno-rolnicza gleby – Oznaczanie zawartości przyswajalnego cynku (norma wycofana, bez zastąpienia),

- PN-R-04021:1994 Analiza chemiczno-rolnicza gleby – Oznaczanie zawartości przyswajalnego żelaza (norma wycofana, bez zastąpienia).

Dokonano również badania zawartości próchnicy w glebie, określono skład granulometryczny wraz z procentową oceną zawartości frakcji mechanicznych średnicy gleby na podstawie wewnętrznych procedur Okręgowej Stacji Chemiczno-Rolniczej w Poznaniu.

3.3.2. Badania wydajności włókna długiego

Badania wydajności włókna długiego wykonano w Instytucie Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich Państwowym Instytucie Badawczym w Zakładzie Innowacyjnych Technologii Włókienniczych w Pracowni Technologii Przetwórstwa Roślin Włóknistych – Laboratorium Technologicznej Oceny Słomy oraz Włókna zgodnie z Polską Normą PN-P-04680-09:1987 Metody badań surowców włókienniczych – Słoma lniana roszona – Wyznaczanie wydajności włókna długiego. Norma została wycofana, nie została zastąpiona inną normą. Wydajność włókna długiego otrzymanego w wyniku przerobu słomy lnianej roszanej na turbinie małogabarytowej (W_M) obliczono według wzoru:

$$W_M = 0,8 \frac{m_w + 0,6 \cdot n}{m_s} \cdot 100 \quad (1)$$

gdzie:

0,8 – stały współczynnik, umożliwiający porównanie wyniku wydajności (W_M) z wydajnością włókna uzyskaną na zespole turbinowym typu Etrich,

m_w – masa włókna długiego, czystego [g],

0,6 – stały współczynnik korygujący,

n – masa włókna długiego niedotrzymanego [g],

m_s – masa próbki słomy roszanej odziarnionej po potrąceniu zanieczyszczeń [g].

3.3.3. Badania długości średniej wagowej włókna

Badania średniej długości wagowej włókna wykonano w Instytucie Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich Państwowym Instytucie Badawczym w Zakładzie Innowacyjnych Technologii Włókienniczych w Laboratorium Włókienniczym stosując metodę segregacji, zgodnie z Normą Branżową BN-86/7511-16 Surowce włókiennicze – Metody badań surowców włókienniczych – Włókno lniane i konopne – Wyznaczanie długości. Wymieniona norma została wycofana, ponieważ wszystkie normy branżowe przestały istnieć, nie została jednak opracowana nowa norma, która by ją zastąpiła. Oznaczenie długości włókien określono na podstawie rozkładu długościowego przeprowadzonego w adekwatnie dobranych przedziałach klasowych. Zastosowano odstępstwo od normy (punkt 3.1.3.1. normy: Przygotowanie próbek włókna długiego) ze względu na małą próbkę ogólną włókna. Pobrano 1 próbkę o masie 3 g, z której usunięto zanieczyszczenia, a następnie aklimatyzowano zgodnie z normą PN-83/P-04602. Przeprowadzono ręczną segregację włókien z próbki, podczas której wyciągano pincetą włókna, dokonywano pomiaru oraz umieszczano w odpowiednim przedziale klasowym (pierwszy 0÷20 mm, drugi 21÷40 mm, trzeci 41÷60 mm itd.) na tkaninie aksamitnej. Włókna z każdej klasy długościowej zważono z dokładnością do 0,001 g. Długość średnią wagową ($\bar{l}$) obliczono według wzoru:

$$\bar{l} = \frac{\sum_{i=1}^{i=K} l_i m_i}{\sum_{i=1}^{i=K} m_i} \quad (2)$$

gdzie:

m_i – masa włókien w i -tej klasie [mg],

$\bar{l}_i$ – średnia długość i -tej klasy [mm],

K – liczba klas.

3.3.4. Badania masy liniowej włókna

Badania masy liniowej włókien lnianych wykonano w Instytucie Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich Państwowym Instytucie Badawczym w Zakładzie Innowacyjnych Technologii Włókienniczych w Laboratorium Włókienniczym

stosując metodę grawimetryczną, bazując na Polskiej Normie PN-EN ISO 1973:2011 Włókna tekstylne – Wyznaczanie masy liniowej – Metoda grawimetryczna i metoda wibroskopowa, która również została wycofana, ale nowa norma nie została wprowadzona. Utworzono 10 pęczków włókien o długości 10 mm, w skład których wchodziło 100 szt. odcinków włókien lnianych. Pęczki zważono z dokładnością do 0,1 mg. Badanie przeprowadzono w warunkach klimatu normalnego. Obliczono średnią masę liniową włókien, wyniki podano w tex.

3.3.5. Badania wskaźników przy rozciąganiu statycznym włókien lnu

Badania wskaźników przy rozciąganiu statycznym włókien lnu wykonano w Instytucie Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich Państwowym Instytucie Badawczym w Zakładzie Innowacyjnych Technologii Włókienniczych w Laboratorium Włókienniczym zgodnie z wycofaną Polską Normą PN-P-04676:1986 Metody badań surowców włókienniczych – Włókno lniane i konopne – Wyznaczanie wskaźników przy rozciąganiu statycznym, ponieważ nowa norma nie została opracowana. Badanie przeprowadzono z użyciem maszyny wytrzymałościowej STATIMAT ME w warunkach klimatu normalnego. Wyznaczono wytrzymałość właściwą, siłę zrywającą oraz wydłużenie 5 pęczków włókien. Odległość między zaciskami zrywarki wynosiła 3 mm, a prędkość zrywania była równa 10 mm/min.

3.3.6. Badania mikroskopowe włókien lnu

Analizę widoków wzdłużnych i przekrojów poprzecznych włókien lnianych wykonano w Instytucie Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich Państwowym Instytucie Badawczym w Zakładzie Innowacyjnych Technologii Włókienniczych w Laboratorium Włókienniczym z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego ze zmienną próżnią Hitachi S-3400N. Badania wykonano w trybie wysokiej próżni z użyciem detektora elektronów wtórnych. Próbkę włókien została wcześniej napyłona warstwą złota za pomocą napyłarki próżniowej Sputter Coater

108 auto. Obserwacje widoków wzdłużnych i przekrojów poprzecznych prowadzono stosując powiększenie x250 lub x500, wysokości stolika na poziomie 20 mm oraz przy napięciu przyspieszającym 15 kV. W czasie badań analizowano morfologię powierzchni i przekrojów poprzecznych włókien.

3.3.7. Badania wilgotności włókna

Badania wilgotności włókien lnianych wykonano w Instytucie Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich Państwowym Instytucie Badawczym w Zakładzie Innowacyjnych Technologii Włókienniczych w Pracowni Chemicznej Oceny i Uszlachetniania Surowców Włóknistych zgodnie z wycofaną Polską Normą PN-91/P-04601 Tekstylia – Wyznaczanie wilgotności. Nowa norma poświęcona wyznaczaniu wilgotności tekstyliów nie została opracowana. Wilgotność włókien ustalono na podstawie ubytku masy dwóch prób w porównaniu do ich stałej masy po wysuszeniu, stosując wzór:

$$W = \frac{m - m_1}{m_1} \cdot 100 \quad (3)$$

gdzie:

W – wilgotność próbki [%],

m – masa początkowa próbki [g],

m_1 – masa próbki po wysuszeniu [g].

3.3.8. Oznaczenie zawartości substancji woskowych i tłuszczowych we włóknach lnianych

Badania zawartości substancji woskowych oraz tłuszczowych we włóknach lnianych wykonano w Instytucie Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich Państwowym Instytucie Badawczym w Zakładzie Innowacyjnych Technologii Włókienniczych w Pracowni Chemicznej Oceny i Uszlachetniania Surowców Włóknistych zgodnie z wycofaną Normą Branżową BN-86/7501-10 Surowce Włókiennicze – Metody badań surowców włókienniczych – Włókno lniane i konopne – Wyznaczanie zawartości substancji woskowych i tłuszczowych. Procentową

zawartość substancji woskowych i tłuszczowych we włóknach ustalono poprzez wyekstrahowanie ich z dwóch prób za pomocą organicznego rozpuszczalnika, eteru naftowego w aparacie Soxhleta przez ok. 12 h, a następnie zważeniu suchej masy pozostałości. Zawartość substancji woskowych i tłuszczowych ($W_{TŁ}$) obliczono według wzoru:

$$W_{TŁ} = \frac{m_{TŁ}(100+W)}{m} \quad (4)$$

gdzie:

$W_{TŁ}$ – zawartość wosków i tłuszczu we włóknie [%],

$m_{TŁ}$ – masa substancji woskowych i tłuszczowych po wysuszeniu [g],

m – masa początkowa próbki [g],

W – wilgotność próbki [%].

3.3.9. Oznaczenie zawartości lignin we włóknach lnianych

Badania zawartości lignin we włóknach lnianych wykonano w Instytucie Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich Państwowym Instytucie Badawczym w Zakładzie Innowacyjnych Technologii Włókienniczych w Pracowni Chemicznej Oceny i Uszlachetniania Surowców Włóknistych zgodnie z wycofaną Normą Branżową BN-86/7501-11 Surowce włókiennicze – Metody badania surowców włókienniczych – Włókno lniane i konopne – Wyznaczanie zawartości lignin. Zawartość lignin oznaczono działając na zmielone włókno (za pomocą młynka tnącego SM 100 firmy RETSCH z zastosowaniem sita o oczkach 1 mm) mieszaniną stężonego kwasu siarkowego i ortofosforowego w celu rozpuszczenia celulozy, hemicelulozy oraz pektyn. nierozpuszczalną ligninę odsączono na tyglu filtracyjnym o porowatości G4, a następnie wysuszono do stałej masy. Doświadczenie powtórzono dwukrotnie. Zawartość ligniny obliczono za pomocą wzoru:

$$L = \frac{m_L(100+W)}{m} \quad (5)$$

gdzie:

L – zawartość ligniny we włóknie [%],

m_L – masa ligniny po wysuszeniu [g],

m – masa początkowa próbki [g],

W – wilgotność próbki [%].

3.3.10. Spektroskopia w podczerwieni FTIR-ATR włókien lnianych

Analizę spektrofotometryczną, metodą całkowitego wewnętrznego odbicia FTIR-ATR wykonano w Instytucie Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich Państwowym Instytucie Badawczym w Zakładzie Innowacyjnych Technologii Włókienniczych w Laboratorium Włókienniczym w celu identyfikacji i charakteryzacji substancji organicznych i nieorganicznych obecnych we włóknie. Analiza FTIR-ATR mierzy intensywność promieniowania IR po przejściu przez próbkę i wykorzystując dane do określenia składu chemicznego próbki. Badania wykonano za pomocą modelu iS10 firmy TA Instruments, z zastosowaniem przystawki Smart iTX_ZnSe. Widma dla poszczególnych prób zawierają 32 skany przy rozdzielczości 4 cm⁻¹ w zakresie 600–4000 cm⁻¹.

3.3.11. Zawartość kwasów fenolowych we włóknach lnianych

Metodę separacji związków bioaktywnych we włóknach lnianych wykonano w Zakładzie Farmakologii i Fitochemii w Instytucie Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich Państwowym Instytucie Badawczym w siedzibie w Plewiskach na podstawie badań (Liu i in. 2006 oraz Gryszczyńska i in. 2015).

Przygotowanie próbek polegało na umieszczeniu ok. 0,6 g włókna lnianego w kolbie stożkowej, następnie dodano 15 ml 70% etanolu. Próbkę ekstrahowano w łaźni ultradźwiękowej przez 30 min, schłodzono i przesączono. Włókno ekstrahowano dwukrotnie tą samą procedurą. Supernatanty połączono i odparowano do suchej masy w wyparce obrotowej w próżni. Pozostałość

rozpuszczono w 2 ml 70% etanolu, następnie roztwór przeniesiono do kolby miarowej o pojemności 2 ml. Wzorce analityczne, takie jak: kwas *p*-kumarowy, kwas ferulowy zakupiono w firmie ChromaDex (Irvine, CA, USA), a kwas syringowy, kwas synapinowy w firmie Sigma Aldrich.

Do oznaczenia kwasów fenolowych wykorzystano wysokosprawną chromatografię cieczową HPLC/DAD (1100 system, Agilent). Rozdzielenie i identyfikację kwasów fenolowych w próbkach przeprowadzono metodą analizy chromatograficznej z użyciem kolumny Zorbax Poroshell 120 SB-C18, 2,7 mm × 3,0 mm × 100 mm (Agilent). Fazę ruchomą stanowiła mieszanina dwóch roztworów: fazę A stanowił 0,1% kwas fosforowy, a fazę B: acetonitryl, natomiast do rozdzielania zastosowano elucję gradientową. Szybkość przepływu wynosiła 0,8 ml/min, zaczynając od 90% fazy A (13 min — 78% fazy A, 14 min — 60% fazy A, 30 min — 60% fazy A), temperatura kolumny wynosiła 40°C. Piki zidentyfikowano przez dodanie roztworów wzorcowych, wykorzystując czas retencji i widma UV-VIS. Oznaczenie ilościowe tych związków osiągnięto stosując krzywe kalibracyjne przygotowane z czystymi związkami w czterech powtórzeniach. Detekcję substancji przeprowadzono przy 205 nm, 303 nm i 330 nm długości fali.

3.3.12. Aktywność antyoksydacyjna włókien lnianych

Badania aktywności antyoksydacyjnej włókien lnianych wykonano w Zakładzie Farmakologii i Fitochemii w Instytucie Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich Państwowym Instytucie Badawczym w siedzibie w Plewiskach z wykorzystaniem dwóch metod FRAP (*ang. Ferric Reducing Antioxidant Power*) oraz DPPH (2,2-difenylo-1-pikrylohydrazyl). Metoda FRAP polega na pomiarze zdolności próbki do redukcji jonów żelaza (Fe^{3+}) do jonów żelaza (Fe^{2+}), co jest wskaźnikiem jej potencjalnej aktywności przeciwutleniającej. Metoda DPPH polega na pomiarze zdolności antyoksydacyjnej substancji poprzez zmierzenie redukcji wolnego rodnika DPPH w wyniku oddziaływania z substancją testową. Zmniejszenie absorpcji DPPH wskazuje na wzrost aktywności przeciwutleniającej. Metody pozwalają na pomiar różnych właściwości przeciwutleniającej substancji. Ponadto, charakteryzują się różnymi zakresami czułości, co oznacza, że jedna

metoda może wykryć aktywność przeciwutleniającą, która nie jest wykrywana przez drugą metodę.

Przygotowanie próbek polegało na umieszczeniu w kolbie okrągłodennej ok. 1 g włókna lnianego oraz 25 ml 40% etanolu. Następnie próbkę ogrzewano pod chłodnicą zwrotną przez godzinę. Roztwór ochłodzono i przesączono przez filtr do kolby miarowej o pojemności 25 ml. Próbkę uzupełniono 40% etanolem do objętości 25 ml.

TPTZ (2,4,6-tris(2-pirydylo)-1,3,5-triazyn), DPPH (2,2-difenylo-1-pikrylohydrazyl) dostarczyła Sigma Aldrich (Darmstadt, Niemcy), octan sodu, kwas octowy, kwas chlorowy, chlorek żelazowy i kwas fosforowy zakupiono w Avantor Performance Materials Poland S.A. (Gliwice, Polska), acetonitryl został dostarczony przez J.T. Baker (Phillipsburg, NJ, USA).

3.3.12.1. Ocena zdolności włókien lnianych do redukcji jonów żelaza oznaczona metodą FRAP

Sposób oznaczenia zdolności redukcji jonów żelaza FRAP opracowano w Zakładzie Farmakologii i Fitochemii IWNIRZ PIB na podstawie badań (Benzie i Strain 1996), która polega na pomiarze redukcji związku TPTZ (2,4,6-tris(2-pirydylo)-1,3,5-triazyna) pod wpływem działania przeciwutleniacza. Aktywność ekstraktu z włókien wobec jonów żelaza została zmierzona przy różnych stężeniach ekstraktu, który został przygotowany poprzez rozcieńczenie roztworu próbki 40% etanolem. Następnie 0,5–2,5 ml roztworu próbki uzupełniono 40% etanolem do objętości 2,5 ml. Roztwór testowy został przygotowany w probówce z 3,0 ml roztworu TPTZ oraz 0,1 ml roztworu próbki o pięciu różnych stężeniach i 0,3 ml wody. Probówki inkubowano przez 4 minuty w kąpieli wodnej (37°C). Następnie próbki zostały schłodzone oraz zmierzono absorbancje przy $\lambda=593$ nm przez porównanie z cieczą kompensacyjną, stosując 3 powtórzenia. Płyn kompensacyjny został przygotowany z 3,0 ml roztworu TPTZ, 0,1 ml 40% etanolu oraz 0,3 ml wody. Procedura ta została powtórzona dla próbek z ekstraktem. Świeży roztwór został przygotowany poprzez wymieszanie 30 mM TPTZ w 40 mM kwasie chlorowym, 300 mM buforze octanowym (pH=3,6) oraz 20 mM roztworze chlorku żelaza(III) w stosunku objętości 1:10:1.

Wyznaczona wartość absorbancji próbki jest wprost proporcjonalna do stężenia przeciwutleniacza, która następnie została przeliczona na jednostkę FRAP stosując porównanie z roztworem wzorcowym wg wzoru (Wilczyńska 2009):

$$\frac{\Delta A_{593\text{nm}} \text{ próbki}}{\Delta A_{593\text{nm}} \text{ wzorca}} \times \text{wartość FRAP wzorca (1000 } \mu\text{M)} \quad (6)$$

3.3.12.2. Metoda oceny właściwości antyoksydacyjnych włókien lnianych z wykorzystaniem rodnika DPPH

Metoda wykorzystywana do oznaczania aktywności antyoksydacyjnej z użyciem roztworu DPPH została dostosowana do badań prób w Zakładzie Farmakologii i Fitochemii IWNIRZ PIB na podstawie badań (Huang i in. 2005, Katalinic i in. 2006 oraz Qian i Nihorimbere 2004). Aktywność ekstraktu z włókien wobec wolnych rodników została zmierzona w pięciu różnych stężeniach ekstraktu, przygotowanych poprzez rozcieńczenie roztworu próbki 40% etanolem. Do probówek dodano 0,5–2,5 ml roztworu próbki, a następnie uzupełnionej do objętości 2,5 ml 40% etanolem. Roztwór testowy przygotowano w probówce z 3,9 ml roztworu DPPH w etanolu (6×10^{-5} M) i 0,1 ml roztworu próbki o różnych stężeniach. Roztwór testowy został wymieszany i przechowywany w ciemności. Absorbancja badanego roztworu została zmierzona po 30 minutach przy $\lambda=515$ nm poprzez porównanie z 40% etanolem w trzech powtórzeniach. Różnice w absorbancji między próbkami oraz kontrolą obliczono i wyrażono jako procentową zdolność wychwytywania rodnika DPPH, korzystając ze wzoru (Pękał 2014):

$$I_{\%} = \frac{(A_0 - A_t)}{A_0} \cdot 100 \quad (7)$$

gdzie:

$I_{\%}$ – procent inhibicji rodnika DPPH [%],

A_0 – początkowa wartość absorbancji rodnika DPPH,

A_t – absorbancja rodnika DPPH po ustalonym czasie reakcji (t).

Ponadto, korzystając z krzywej kalibracji oraz równania prostej wyznaczono parametr IC_{50} , który określa wymagane stężenie substancji zawierającej przeciwutleniacz do usunięcia 50% początkowych rodników DPPH.

3.3.13. Szerokokątowa dyfraktometria rentgenowska włókien lnianych

Badania szerokokątowej dyfraktometrii rentgenowskiej włókien lnianych wykonano w Instytucie Włókiennictwa Politechniki Łódzkiej w celu dokonania analizy struktury nadcząsteczkowej włókien pod względem stopnia fazy krystalicznej z użyciem dyfraktometru rentgenowskiego z systemem X'Pert Pro System (PAN Analytical, Królestwo Niderlandów). Źródłem promieniowania była lampa rentgenowska z miedzianą anodą o długości fali promieniowania rentgenowskiego $CuK\alpha$ ($\lambda=0,154$ nm). Napięcie przyspieszające wynosiło: 40 kV, prąd anodowy: 30 mA. Licznik półprzewodnikowy X'Celektor służył jako detektor. Przed pomiarami włókna lniane rozdrobniono za pomocą młyna tnącego SM 100 firmy RETSCH z zastosowaniem sita o oczkach 1 mm w Instytucie Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich Państwowym Instytucie Badawczym w Zakładzie Innowacyjnych Technologii Włókienniczych w Pracowni Chemicznej Oceny i Uszlachetniania Surowców Włóknistych. Widma dyfrakcyjne uzyskano w zakresie $2\theta=0-60^\circ$ z wielkością kroku wynoszącą 2° przy pracy ciągłej w jednym powtórzeniu. Stopień krystaliczności oszacowano z wykorzystaniem oprogramowania WAXSFIT na podstawie metody Hindeleha – Johnsona (Rabiej i Rabiej 2006)

4. WYNIKI I DYSKUSJA

4.1. Wyniki analizy jakościowej gleby

Uprawy roślin stawiają specjalistyczne wymagania dotyczące właściwości gleby, żyzności i zawartości składników odżywczych w odpowiednich proporcjach. Niekorzystne środowisko (np. brak wody, ekstremalne temperatury, zanieczyszczenie powietrza), niedobór składników pokarmowych i nieoptymalna kwasowość gleby zmniejszają wielkość i jakość plonu. Rośliny posiadają ograniczoną zdolność do selektywnego pobierania składników mineralnych z gleby. Spośród wszystkich pierwiastków występujących naturalnie na Ziemi tylko 17 z nich jest szczególnie istotnych dla wzrostu, plonowania i rozwoju roślin. Pierwiastki można podzielić na makroelementy i mikroelementy. Makroelementy pełnią głównie funkcje budulcowe, natomiast mikroelementy biorą udział w reakcjach metabolicznych oraz pełnią funkcje fizjologiczne w roślinach (Kocoń 2013). Analiza jakości gleby, przed uprawą roślin, miała na celu określenie jej składu chemicznego oraz fizycznego, aby umożliwić odpowiednie przygotowanie oraz zapewnienie optymalnych warunków roślinom do wzrostu.

Przeprowadzone w ramach pracy doktorskiej badania fizyczne gleby obejmowały ocenę jej struktury, która wpływa na zdolność do magazynowania wody i składników odżywczych. Frakcjami granulometrycznymi określa się zbiór cząstek mineralnych o określonych wielkościach, które występują w glebie. Procentowa zawartość danych frakcji wpływa na właściwości fizyczne, chemiczne gleby (Róžański 2010). Nazwy danych frakcji oraz podział granicznych wartości mogą różnić się od siebie w zależności od danej nauki (gleboznawstwo, geologia, budownictwo itp.) oraz systemu przyjętego w danym kraju. Podział zastosowanych (tabela 8) frakcji oraz średnicy ziaren opiera się na najpopularniejszym podziale na frakcje granulometryczne w gleboznawstwie, który został opracowany w 1993r. przez USDA oraz dostosowany do warunków występujących na obszarze Polski w formie Uchwały Zarządu Głównego Polskiego Towarzystwa Gleboznawczego z dnia 5 marca 2008r (Skłodowski 2009). Frakcja piaskowa zapewnia dobrą przepuszczalność wody oraz powietrza w glebie, pozwalając roślinom rozwinąć system korzeniowy, z drugiej strony posiada większą tendencję do wysychania oraz

charakteryzuje się niską żyznością. Frakcja pyłowa gleby umożliwia zatrzymywanie wody i składników odżywczych. Gleby o zbyt dużej zawartości ił charakteryzują się mniejszą przepuszczalnością wody i powietrza co ogranicza rozwój korzeni i oraz plonowanie roślin (Ryżak i in. 2009). Powszechnie, zaleca się stosowanie gleb o zróżnicowanych proporcjach frakcji granulometrycznych, gdyż są one istotnym czynnikiem wzrostu roślin. Gleby: piasek gliniasty (z przewagą piasków) oraz glina piaszczysta (z przewagą gliny) ocenia się jako najlepsze dla większości roślin uprawnych. Nie istnieje jedna, idealna proporcja frakcji granulometrycznych gleby, która byłaby odpowiednia dla wszystkich roślin. Optymalna proporcja zależy od rodzaju rośliny, warunków klimatycznych, parametrów uprawy, pH gleby, zawartości makro i mikro elementów itp.

Tabela 8. Wyniki analizy jakościowej gleby w latach 2019, 2020, 2021

Rodzaj badania		Rok		
		2019	2020	2021
Procentowa zawartość frakcji granulometrycznych (d – średnica ziaren)	0,05 < d ≤ 2,0 mm	75,78%	71,22%	76,79%
	0,02 < d < 0,05 mm	6,96%	9,35%	10,96%
	0,002 < d < 0,02 mm	14,10%	16,31%	10,62%
	≤ 0,002 mm	3,17%	3,13%	1,64%
	Frakcja piaskowa 0,05 < d ≤ 2,0 mm	75,78%	71,22%	76,79%
	Frakcja pyłowa 0,002 < d ≤ 0,05 mm	21,05%	25,66%	21,58%
	Frakcja iłowa d ≤ 0,002 mm	3,17%	3,13%	1,64%
	Skład mechaniczny	piasek gliniasty	glina piaszczysta	piasek gliniasty
Próchnica		1,30%	1,92%	1,61%
Zawartość składników przyswajalnych [mg/kg gleby]	Bor	0,55	1,39	1,15
	Mangan	109,30	81,50	54,70
	Miedź	4,20	3,70	2,90
	Cynk	7,90	10,10	6,70
	Żelazo	805,00	534,00	423,00
Zawartość składników przyswajalnych [mg/100 g gleby]	Fosfor	11,6	31,0	13,5
	Potas	11,7	27,1	18,2
	Magnez	9,3	8,4	8,6
pH		5,2	6,4	5,9

Źródło: opracowanie własne

Próchnica to organiczna część gleby, która powstała w wyniku rozkładu resztek roślinnych oraz zwierzęcych. Przyczynia się do zdrowego wzrostu roślin, dlatego że jej zawartość poprawia właściwości fizyczne i chemiczne gleby. Długoterminowe utrzymywanie zawartości próchnicy w glebie na stabilnym poziomie jest możliwe dzięki systematycznemu dostarczaniu świeżej materii organicznej oraz zapewnieniu wysokiej aktywności biologicznej gleby.

Zawartość przyswajalnych składników w glebie, takich jak bor, mangan, miedź, cynk i żelazo, jest kluczowa dla zdrowego wzrostu roślin. Każdy z tych pierwiastków pełni ważną rolę w procesach metabolicznych roślin, a ich niedobór może prowadzić do zaburzeń w rozwoju roślin, zmniejszenia plonów lub nawet całkowitego zniszczenia upraw.

Na podstawie wyników analizy jakościowej gleby wykorzystanej w doświadczeniu wazonowym stwierdzono, że zróżnicowane proporcje zawartości frakcji granulometrycznych gleby zapewniają odpowiednią przepuszczalność wody i powietrza umożliwiając roślinom rozwój systemu korzeniowego. Pod względem zawartości próchnicy, ocenia się użyte gleby jako średnio żyzne. W każdym roku doświadczenia, ilość boru w glebie osiągała zalecany poziom. Przyjmuje się, że dla większości upraw rolniczych, optymalna zawartość boru w glebie wynosi ok. 0,5–2 mg/kg (Brdar-Jokanović 2020). Wyniki zawartości manganu w glebie również są na dobrym poziomie, zalecana jego ilość wynosi ok. 30–200 mg/kg (Hong i in. 2010). Zawartość miedzi ocenia się na średnim poziomie. Niedobór tego pierwiastka w glebie może prowadzić do zaburzeń w rozwoju roślin w metabolizmie oraz zachwianie równowagi mineralnej (Sienkiewicz-Cholewa i Wróbel 2004). Poziom cynku w glebie w 2019r. oraz 2020r. osiąga wysoki poziom, natomiast w 2021r. średni. Niedobór tego pierwiastka skutkuje mniejszym plonem roślin (Saleem i in. 2022). Poziom żelaza w glebie w 2019r. ocenia się jako średni, natomiast w 2020r. oraz 2021r. jako niski. Jego niedobór zwiększa podatność roślin na zakażenie patogenami grzybowymi (Kurek i Jaroszuk 1993). Z drugiej strony, nadmiar żelaza w glebie może być szkodliwy dla roślin, powodując toksyczność dla korzeni i zaburzenia w pobieraniu innych składników mineralnych (Lipiński 2013). Fosfor stanowi jeden z trzech kluczowych składników pokarmowych roślin (Kopiński i in. 2013). Wśród zbadanych makroelementów, zaklasyfikowano zawartość fosforu w glebie w 2019r. oraz 2021r. do poziomu średniej zasobności (10,1–15,0 mg/100g

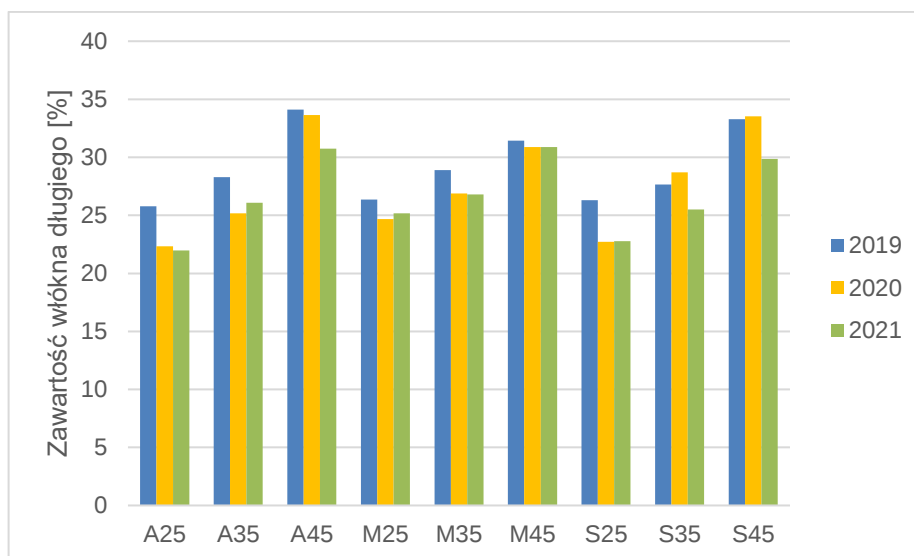
gleby), natomiast w 2020r. do bardzo wysokiej ($>20,1$ mg/100 g gleby) (Ochal 2015). Poziom potasu w 2019r. w glebie osiągał wartość poniżej optymalnej ilości, która powinna osiągać wartość ok. 12,5–17,8 mg/100g gleby (Kulczycki 2012), natomiast w pozostałych latach powyżej. Zawartość magnezu oceniono w 2019r. oraz 2020r. jako bardzo wysoką, a w 2021r. jako wysoką. Zawartość tego pierwiastka w glebie oraz pobieranie go przez rośliny wpływa na aktywację reakcji enzymatycznych, które mają miejsce w organizmie roślin (Tyszkiewicz i in. 2019). Odczyn pH jest istotną cechą gleby, który umożliwia prawidłowy rozwój roślin i plonowanie. Poziom pH w 2019r. zaklasyfikowano jako kwaśny, natomiast w 2020r. oraz 2021r. jako lekko kwaśny. Najbardziej pożądanymi glebami są te, które cechują się odczynem blisko obojętnego (pH 6,6–7,2) lub lekko kwasowym (pH 5,6–6,5) (Mocek 2015). Wymagania glebowe Inu określają wartość pH na poziomie ok. 6,5–6,9 (Heller 2012).

Pomimo pewnych różnic zawartości mikro i makro elementów oraz zawartości pH w glebie, podczas okresu wegetacji roślin na przestrzeni lat, nie zauważono zaburzeń w ich rozwoju. Różnice we wzroście były spowodowane różnym poziomem nawadniania. Nie zarejestrowano zmian np. w zabarwieniu liści, które mogłyby być skutkiem zaburzeń w wytwarzaniu chlorofilu oraz innych odchyśleń, które byłyby efektem toksyczności dla roślin, prowadząc do uszkodzeń tkanek roślinnych, na skutek zbyt dużych ilości składników pokarmowych w glebie.

4.2. Ocena wydajności oraz jakości włókien lnu

4.2.1. Wyniki badań wydajności włókien lnu

Zawartość włókna ogółem w plonie słomy odziarnionej może kształtować się na poziomie ok. 16–25%. Wartości te mogą się różnić od siebie w zależności od zbioru rośliny w różnych fazach wzrostu lnu wg skali BBCH. W momencie, gdy rośliny lnu osiągają wysokość ok. 18–20 cm, determinowana jest zdolność rośliny do plonowania. W tym czasie len przechodzi z wegetatywnego rozwoju w generatywny. Badania wykazują, że włókna pojawiają się bezpośrednio po wschodach roślin, a w fazie szybkiego wzrostu następuje ich wydłużenie (Heller 2012). Sposób uprawy lnu może powodować różną zawartość włókna w słomie lnianej. Włókna lnu zazwyczaj pozyskiwane są z upraw prowadzonych na polach, ze względu na charakter przemysłowy. Warunki atmosferyczne mają istotny wpływ na wydajność włókna długiego. Len wymaga odpowiedniej wilgotności gleby w okresie wegetacji w celu wytworzenia wysokiej jakości włókna, które będzie charakteryzować się odpowiednią długością. Wynik badania wydajności włókna długiego otrzymany w prowadzonym doświadczeniu wazonowym nie powinien być porównywany z wydajnością, którą można uzyskać z doświadczeń polowych, ze względu na zróżnicowanie warunków wzrostu roślin w szklarni i na polu. Rozbieżne wyniki procentowej zawartości włókna długiego wynikają m.in. z różnych wysokości, jakie rośliny osiągnęły w momencie zbioru, średnia wysokość roślin w prowadzonym doświadczeniu została oznaczona czerwonymi liniami na rysunku 19. Ograniczona dostępność roślin do wody wpłynęła na ich wzrost, powodując jednocześnie różnice w długości włókien oraz ich zawartości w łodydze. Procentowa zawartość włókna długiego w słomie, dla każdej odmiany, w każdym roku doświadczenia malała wraz z zastosowaniem większego stresu suszy podczas wzrostu roślin (rys. 21).



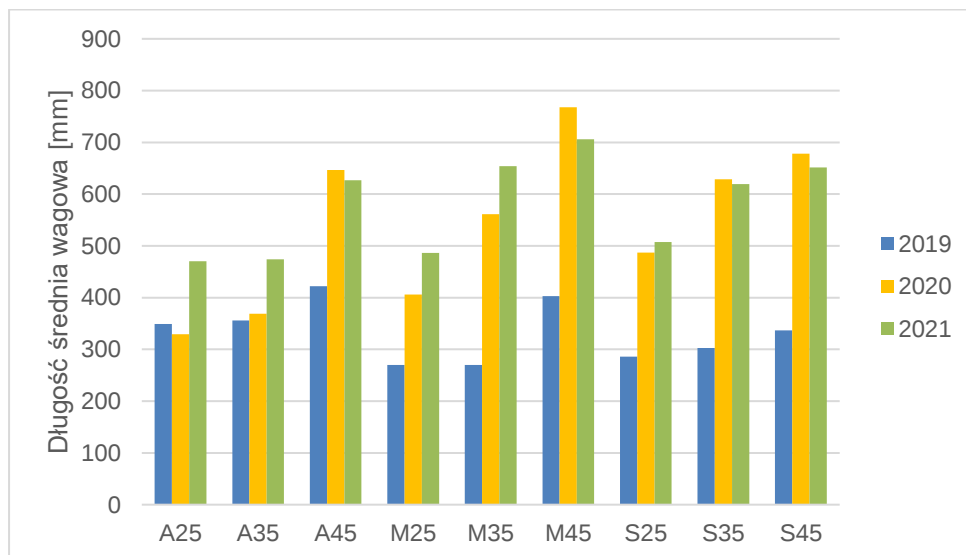
Rys. 21. Procentowa zawartość włókna długiego w słomie lnianej w latach 2019, 2020, 2021

Źródło: opracowanie własne

4.2.2. Wyniki badań średniej długości wagowej włókna

Procesy życiowe roślin są związane z wodą, a jej niedobór wpływa na zaburzenia w ich gospodarce wodnej i odżywianie roślin. Efektem niedoboru wody w podłożu może być ograniczenie transpiracji i zamykanie aparatów szparkowych, co jest przyczyną ograniczenia poboru dwutlenku węgla przez rośliny i spowolnieniem procesu fotosyntezy. Umiarkowany deficyt wody powoduje zwykle zmiany biochemiczne roślin, które pozwalają na przystosowanie organizmu do nowych warunków. Natomiast dosadny niedobór wody najczęściej prowadzi do funkcjonalnych i strukturalnych zmian, które wpływają na wzrost i produktywność roślin (Jastrzębska i in. 2016). Optymalna wilgotność gleby na poziomie 45% PPW zapewniła roślinom dogodne warunki wzrostu w przypadku kontroli dla wszystkich odmian badanego lnu (A45, M45, S45), co przejawiało się osiągnięciem lepszych parametrów długości średniej wagowej włókien w porównaniu do uprawy w warunkach suszy. Rysunek 22 przedstawia wyniki badania długości średniej, wagowej włókien lnu dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z lat 2019, 2020, 2021. Długie włókna umożliwiają tworzenie przędz systemem przędzenia na mokro o większej wytrzymałości,

wydłużeniu, równomierności oraz gładkości. Większa długość włókien daje możliwość zastosowania niższej liczby skrętów podczas przędzenia gwarantując odpowiednie parametry mechaniczne przędzy wpływając korzystnie na wydajność przędzarki. Włókno przeznaczone do przerobu mokroprędnym Iniańskim systemem dla włókna długiego musi mieć wyrównaną długość, pozwalającą na tworzenie jednorodnych garści, aby ograniczyć straty włókna podczas procesu czesania. Włókna do przędzenia czesankowego powinny osiągać długość 300 ÷ 500 mm (Jackowski i Chylewska, 1999). Krótsze włókna, znajdujące się w garści, nie zostaną zakleszczone w zaciskach, zostaną usunięte przez płachty czeszące, powiększając masę włókna krótkiego w postaci wyczesów, kosztem włókna długiego.



Rys. 22. Wyniki badań długości średniej wagowej włókien Inu dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z lat 2019, 2020, 2021

Źródło: opracowanie własne

4.2.3. Wyniki badań masy liniowej włókna

Masa liniowa włókien w istotnym stopniu wpływa na masę liniową przędzy, dlatego że w przekroju poprzecznym przędzy powinna znajdować się odpowiednia ich ilość. Im wykorzystane włókna będą cieńsze, tym przędza będzie charakteryzować się niższą masą liniową, a w efekcie płaski wyrób włókienniczy,

wykonany z tych surowców, osiągnie parametry pozwalające na produkcję wysokiej jakości lekkich wyrobów odzieżowych. Niższa masa liniowa pozwala na zwiększenie liczby włókien w przekroju poprzecznym przędzy, pozwalając na otrzymanie przędzy o niższej nierównomierności masy liniowej, co wynika ze wzoru (Jackowski i Chylewska, 1999):

$$Tt_p = n \cdot Tt_{wł} \quad (8)$$

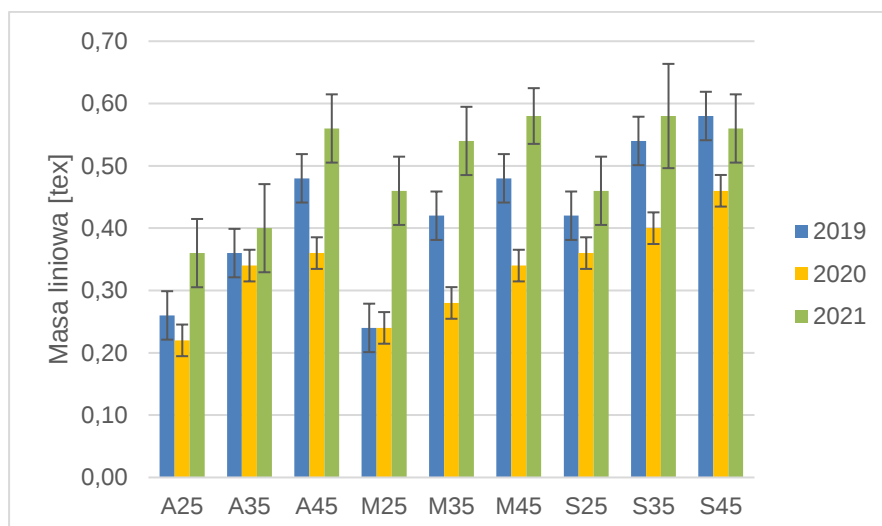
gdzie:

Tt_p – masa liniowa przędzy [tex],

n – liczba włókien w przekroju przędzy,

$Tt_{wł}$ – masa liniowa włókna [tex].

Włókna ekstrahowane z roślin rosnących w warunkach największego stresu suszy (25% PPW) wykazywały najniższą masę liniową (rys. 23). Parametr ten wzrastał wraz ze wzrostem wilgotności gleby, osiągając największą wartość dla wilgotności kontrolnej (45% PPW). Włókna ekstrahowane ze wszystkich badanych odmian lnu wykazywały podobną zależność. W łodydze włókno lnu występuje w postaci sklejonych wiązek zwanych włóknem technicznym. Zastosowane wstępne procesy mechaniczne pozwoliły podzielić włókno techniczne na mniejsze kompleksy włókien i włókna elementarne. Wśród badanych przypadków, odmiana lnu Artemida charakteryzowała się najniższą masą liniową włókna, która w przemyśle włókienniczym jest najbardziej pożądana w celu tworzenia cienkich wyrobów o wysokiej jakości. Odmiana Sara cechowała się najgrubszymi włóknami wśród badanych wariantów.



Rys. 23. Wyniki badań średniej masy liniowej włókien lnu dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z lat 2019, 2020, 2021
Źródło: opracowanie własne

Wyniki statystycznej oceny danych z wykorzystaniem wieloczynnikowego modelu analizy wariancji w schemacie mieszanym ujawniły istotne statystycznie różnice pomiędzy poszczególnymi odmianami lnu (tabela 9). Ich porównanie z pominięciem innych czynników wykazało, że włókna odmiany Artemida cechowały się najniższą masą linową w porównaniu do pozostałych odmian, ponadto odmiana Sara charakteryzowała się istotnie statystycznie wyższą masą liniową niż Modran. Odnotowano również istotny statystycznie efekt główny czynnika wilgotności gleby podczas wzrostu roślin. Testy post-hoc obliczone metodą Bonferroniego wykazały, że wraz ze wzrostem PPW wzrastał istotnie wskaźnik masy liniowej.

Tabela 9. Wpływ odmiany lnu i stopnia wilgotności gleby na wskaźnik masy liniowej włókna mierzony w trzech kolejnych latach: część I (efekty główne)

		<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2	<i>Post-hoc</i>
A	2019	90	0,42	0,12	224,79	0,001	0,613	A < C**
B	2020	90	0,33	0,09				B < A**
C	2021	90	0,50	0,09				B < C**
I	Artemida	90	0,37	0,11	92,29	0,001	0,311	I < II**
II	Modran	90	0,40	0,13				I < III**
III	Sara	90	0,48	0,10				II < III**

Źródło: opracowanie własne

Tabela 9. Wpływ odmiany lnu i stopnia wilgotności gleby na wskaźnik masy linowej włókna mierzony w trzech kolejnych latach: część I (efekty główne) c.d.

a	25%	90	0,34	0,10	156,94	0,001	0,528	a < b**
b	35%	90	0,43	0,11				a < c**
c	45%	90	0,49	0,10				b < c**

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

Źródło: opracowanie własne

Istotne statystycznie okazały się również wszystkie efekty interakcji (tabela 10). Jednym z nich jest efekt interakcji występujący pomiędzy odmianą lnu, a poziomem wilgotności gleby. Testy post-hoc ujawniły, że w obrębie upraw odmian Artemida, Modran oraz Sara, im wyższa była wilgotność gleby podczas wzrostu roślin, tym istotnie statystycznie wyższa była średnia masa linowa włókien. Z kolei w obrębie warunków 25% PPW oraz 35% PPW gleby, odmiany Sara i Modran uzyskiwały istotnie wyższą masę linową niż Artemida. W przypadku 45% PPW gleby uzyskano podobny efekt, ale w tym wypadku masa liniowa włókien odmiany Modran nie różniła się już w sposób istotny statystycznie od masy linowej włókien odmiany Artemida (rys. 24).

Tabela 10. Wpływ odmiany lnu i stopnia wilgotności gleby na wskaźnik masy linowej włókna mierzony w trzech kolejnych latach: część II (efekty interakcji 2 rzędu)

		<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2	<i>Post-hoc</i>
I.A	Artemida 2019	30	0,37	0,10	15,58	0,001	0,085	I.A < III.A**;
I.B	Artemida 2020	30	0,31	0,08				I.B < III.B**;
I.C	Artemida 2021	30	0,44	0,10				I.C < III.C**;
II.A	Modran 2019	30	0,38	0,12				II.A < III.A**;
II.B	Modran 2020	30	0,29	0,06				II.B < III.B**;
II.C	Modran 2021	30	0,53	0,07				I.C**;
III.A	Sara 2019	30	0,51	0,09				I.B < I.A**;
III.B	Sara 2020	30	0,41	0,07				I.C**;
III.C	Sara 2021	30	0,53	0,08				II.A < II.C**;
I.a	Artemida 25%	30	0,28	0,08	3,70	0,008	0,025	II.B < II.C**;
I.b	Artemida 35%	30	0,37	0,06				III.B < III.A**;
I.c	Artemida 45%	30	0,47	0,10				III.B < III.C**;
II.a	Modran 25%	30	0,31	0,12				III.C**;
II.b	Modran 35%	30	0,41	0,12				I.a < I.b**;
II.c	Modran 45%	30	0,47	0,12				I.b < I.c**;
III.a	Sara 25%	30	0,41	0,06				II.a < II.b**;
III.b	Sara 35%	30	0,51	0,10				II.b < II.c**;
III.c	Sara 45%	30	0,53	0,08				III.a < III.b**;

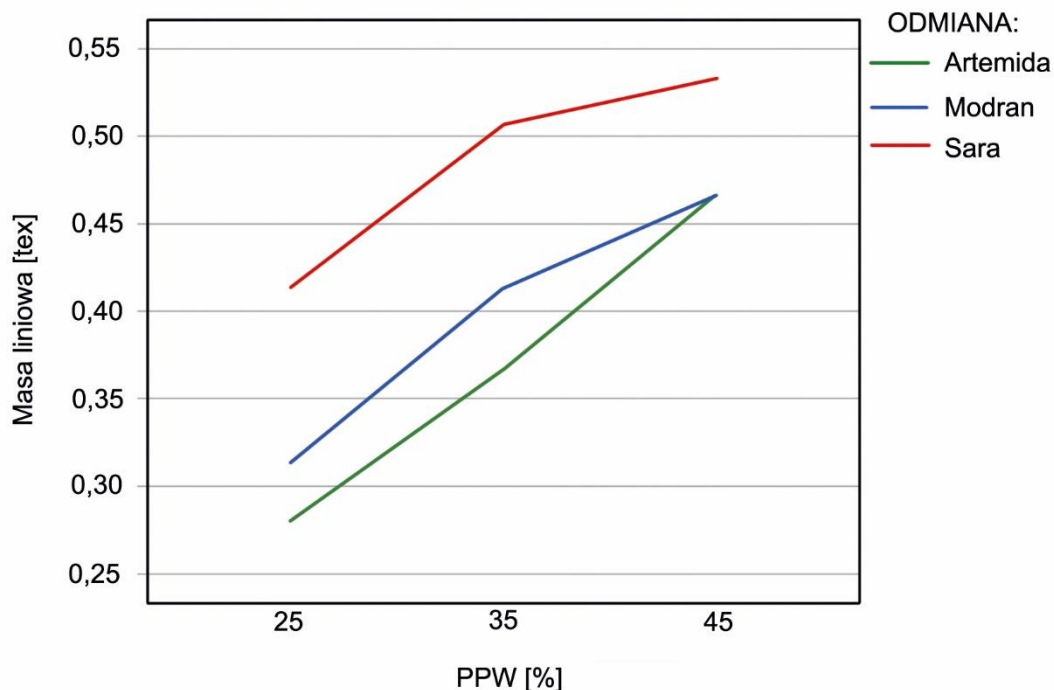
Źródło: opracowanie własne

Tabela 10. Wpływ odmiany lnu i stopnia wilgotności gleby na wskaźnik masy linowej włókna mierzony w trzech kolejnych latach: część II (efekty interakcji drugiego rzędu) c.d.

a.A	25% 2019	30	0,31	0,09	6,71	0,001	0,037	a.A < a.C**; a.B <
a.B	25% 2020	30	0,27	0,08				a.A*; a.B < a.C**; b.A
a.C	25% 2021	30	0,43	0,07				< b.C**; b.B < b.A**;
b.A	35% 2019	30	0,44	0,09				b.B < b.C**; c.A <
b.B	35% 2020	30	0,34	0,07				c.C**; c.B < c.A**; c.B
b.C	35% 2021	30	0,51	0,10				< c.C**; a.A < b.A**;
c.A	45% 2019	30	0,51	0,08				a.A < c.A**; a.B <
c.B	45% 2020	30	0,39	0,07				b.B**; a.B < c.B**; a.C
c.C	45% 2021							< b.C**; a.C < c.C**;
		30	0,57	0,05				b.A < c.A**; b.B <
								c.B**; b.C < c.C**;

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

Źródło: opracowanie własne



Rys. 24. Wpływ odmiany lnu i poziomu wilgotności gleby na masę linową włókien – efekt interakcji

Źródło: opracowanie własne

4.2.4. Wyniki badań wskaźników przy rozciąganiu statycznym włókien

Wytrzymałość właściwa włókien w znaczący sposób wpływa na wytrzymałość przędzy, determinując jej właściwości oraz płaskiego wyrobu włókienniczego z których będzie wytworzona. Z tego powodu oczekuje się jak najlepszych wartości tego parametru. Zależność między wytrzymałością właściwą przędzy i włókien w idealnym przypadku określa równanie (Jackowski i Chylewska, 1999):

$$W_P = \frac{P}{T_{tP}} = \frac{p \cdot n}{T_{tWl}} = W_{Wl} \quad (9)$$

gdzie:

W_P – wytrzymałość właściwa przędzy [cN/tex],

W_{Wl} – wytrzymałość właściwa włókna,

n – liczba włókien w przekroju poprzecznym przędzy,

P – siła zrywająca przędzy [cN],

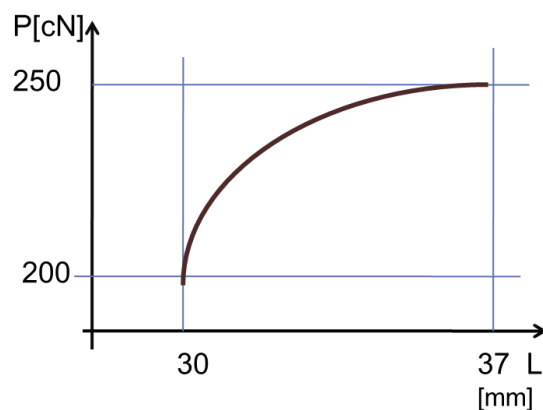
p – siła zrywająca włókien [cN],

T_{tP} – masa liniowa przędzy [tex],

T_{tWl} – masa liniowa włókien [tex].

W rzeczywistości wytrzymałość właściwa przędzy jest niższa od wytrzymałości właściwej włókien z których jest stworzona. Wynika to z kilku przyczyn:

- zróżnicowania długości włókien w przędzy (rys. 25),
- specyfiki procesu zrywania – część włókien ulega przerwaniu, a pozostałe wyslizgują się ze strumienia włókien w przędzy,
- różnej wytrzymałości – wydłużenie oraz kolejność zrywu włókien w przędzy wpływają na końcowy wynik wytrzymałości właściwej,
- nierównomierność masy liniowej przędzy – pocienienia stanowią najsłabsze miejsca w przędzy podatne na zerwanie (Jackowski i Chylewska, 1999).



Rys. 25. Siła zrywająca włókien w funkcji ich długości
Źródło: (Jackowski i Chylewska 1999)

Współczynnik wykorzystania wytrzymałości włókien w przędzy η określa stosunek wytrzymałości właściwej przędzy do wytrzymałości właściwej włókien, gdzie osiąga wartość zawsze poniżej jedności, a najczęściej przyjmuje wartości:

- 0,4–0,6 dla bawełny (przędzenie obręczkowe),
- 0,32–0,48 dla bawełny (przędzenie rotorowe) (Jackowski i Chylewska, 1999)

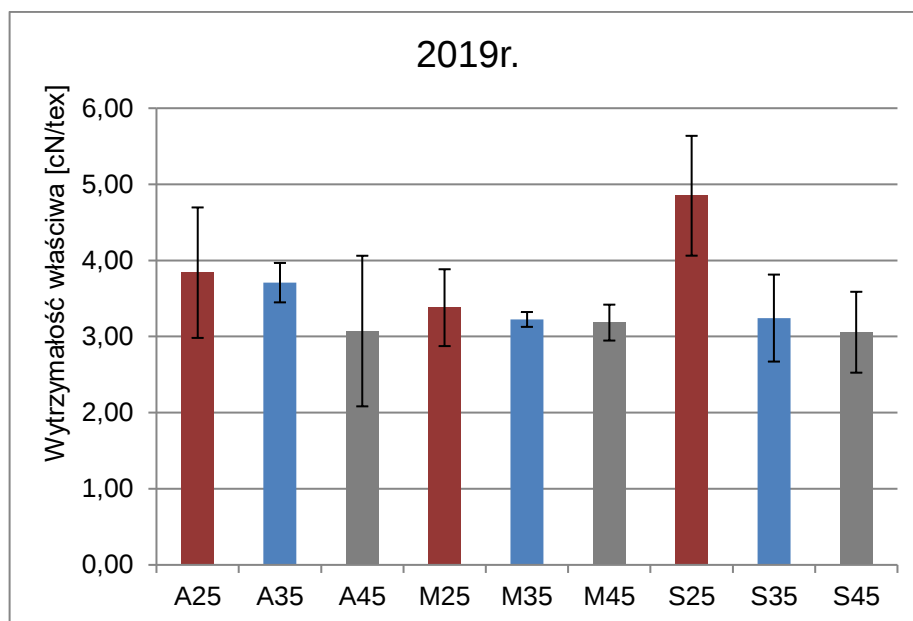
$$\eta = \frac{W_p}{W_{wt}} < 1 \quad (10)$$

gdzie:

W_p -wytrzymałość właściwa przędzy [cN/tex],

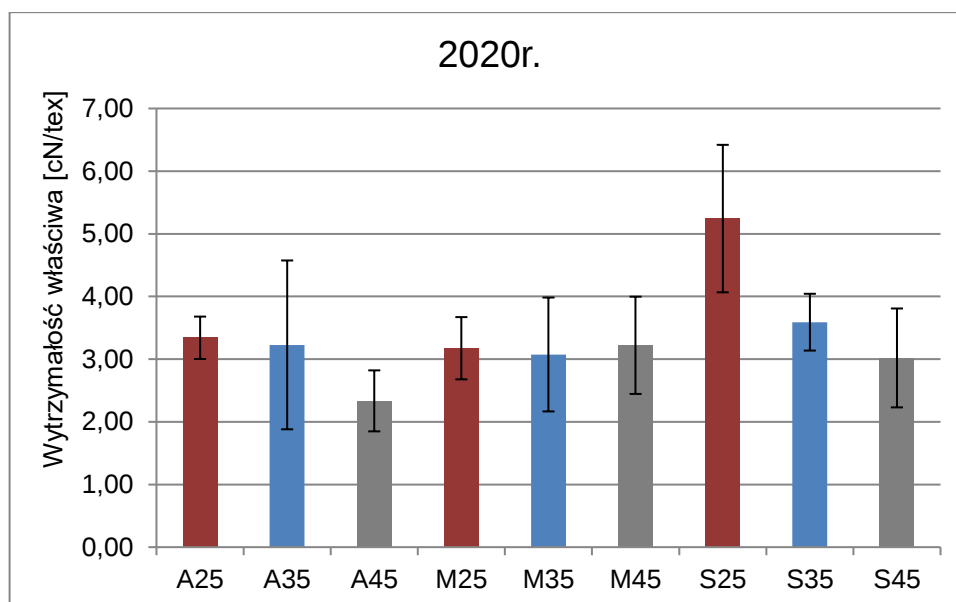
W_{wt} -wytrzymałość właściwa włókien [cN/tex],

W ramach doktoratu przeprowadzono analizę średniej wytrzymałości właściwej włókien lnianych pochodzących z doświadczenia wazonowego, dla różnych odmian lnu, stopnia wilgotności gleby oraz kolejnych lat upraw lnu. Wyniki zaprezentowano na rysunkach 26, 27 oraz 28.



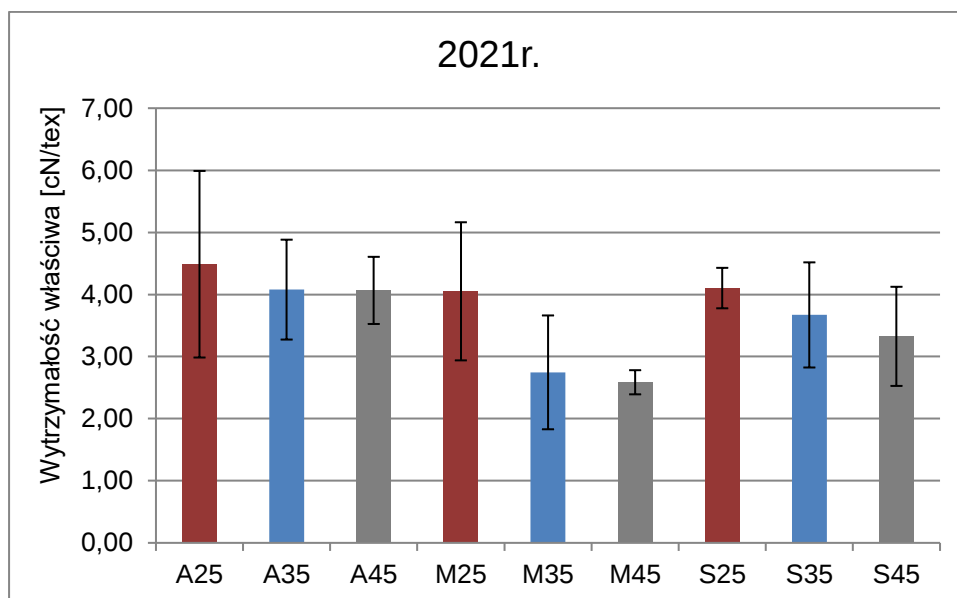
Rys. 26. Wyniki badania średniej wytrzymałości właściwej włókien Iru dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z 2019r.

Źródło: opracowanie własne



Rys. 27. Wyniki badania średniej wytrzymałości właściwej włókien Iru dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z 2020r.

Źródło: opracowanie własne



Rys. 28. Wyniki badania średniej wytrzymałości właściwej włókien Inu dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z 2021r.
Źródło: opracowanie własne

W celu sprawdzenia wpływu odmiany Inu i stopnia wilgotności gleby podczas wzrostu roślin na wytrzymałość właściwą włókien zbadaną w trzech kolejnych latach (2019, 2020, 2021r.), obliczono wieloczynnikowy model analizy wariancji w schemacie mieszanym (tabela 11, tabela 12).

Tabela 11. Wpływ odmiany Inu i stopnia wilgotności gleby na wytrzymałość właściwą włókna mierzoną w trzech kolejnych latach: część I (efekty główne)

		<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2	<i>Post-hoc</i>
A	2019	45	3,51	0,78	1,73	0,184	0,033	n.i.
B	2020	45	3,36	1,05				
C	2021	45	3,68	1,01				
I	Artemida	45	3,57	1,02	8,55	0,001	0,156	II < I*
II	Modran	45	3,18	0,73				II < III**
III	Sara	45	3,79	1,01				
a	25%	45	4,05	1,04	21,81	0,001	0,397	b < a**
b	35%	45	3,40	0,80				c < a**
c	45%	45	3,10	0,74				

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

Źródło: opracowanie własne

Tabela 12. Wpływ odmiany Inu i stopnia wilgotności gleby na wytrzymałość właściwą włókna mierzoną w trzech kolejnych latach: część II (efekty interakcji 2 rzędu)

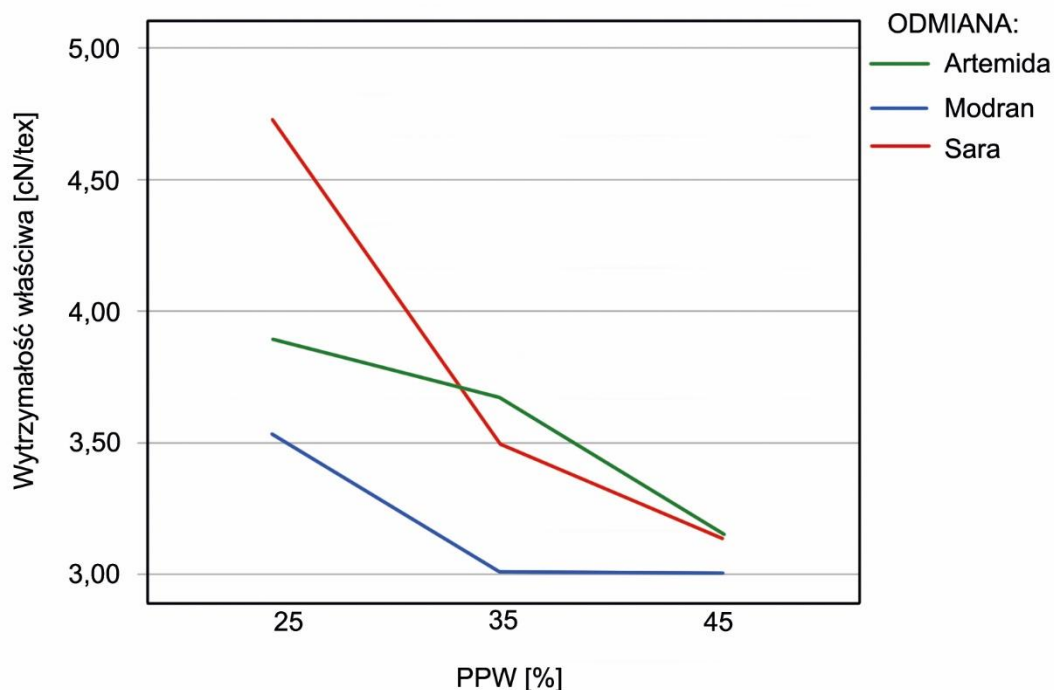
		<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2	<i>Post-hoc</i>
I.A	Artemida 2019	15	3,54	0,80	3,82	0,007	0,147	I.A < I.C
I.B	Artemida 2020	15	2,98	0,92				I.B < I.C**
I.C	Artemida 2021	15	4,21	0,98				I.B < III.B**
II.A	Modran 2019	15	3,26	0,32				II.B < III.B*
II.B	Modran 2020	15	3,16	0,70				II.C < I.C**
II.C	Modran 2021	15	3,13	1,03				
III.A	Sara 2019	15	3,72	1,02				
III.B	Sara 2020	15	3,95	1,26				
III.C	Sara 2021	15	3,70	0,72				
I.a	Artemida 25%	15	3,90	1,06	3,27	0,022	0,119	I.c < I.a*
I.b	Artemida 35%	15	3,67	0,92				III.b < III.a**
I.c	Artemida 45%	15	3,15	0,98				III.c < III.a**
II.a	Modran 25%	15	3,54	0,81				I.a < III.a**
II.b	Modran 35%	15	3,01	0,72				II.a < III.a**
II.c	Modran 45%	15	3,00	0,54				II.b < I.b*
III.a	Sara 25%	15	4,73	0,92				
III.b	Sara 35%	15	3,50	0,63				
III.c	Sara 45%	15	3,14	0,68				
a.A	25% 2019	15	4,03	0,93	0,11	0,977	0,004	n.i.
a.B	25% 2020	15	3,92	1,20				
a.C	25% 2021	15	4,22	1,04				
b.A	35% 2019	15	3,39	0,41				
b.B	35% 2020	15	3,30	0,93				
b.C	35% 2021	15	3,49	0,98				
c.B	45% 2020	15	2,86	0,76				
c.C	45% 2021	15	3,33	0,82				

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

Źródło: opracowanie własne

Efekt główny pomiarów w kolejnych latach okazał się nieistotny statystycznie, co oznacza, że izolowany pomiar wytrzymałości właściwej włókien (bez względu na odmianę Inu i stopień wilgotności gleby) był podobny w każdym kolejnym roku. Wystąpił natomiast istotny statystycznie efekt główny odmiany Inu. Testy efektów prostych uwzględniające poprawkę Bonferroniego wykazały, że pomijając czynnik wilgotności i czynnik lat, włókna odmiany Modran cechowały się istotnie statystycznie niższą wytrzymałością niż Artemida i Sara. Istotny okazał się również efekt główny czynnika wilgotności gleby. Efekt polegał na tym, że w przypadku 25%

PPW gleby, wytrzymałość właściwa włókien była istotnie statystycznie wyższa niż w przypadku 35% PPW i 45% PPW dla każdej badanej odmiany (rys. 29).



Rys. 29. Wpływu odmiany lnu i stopnia wilgotności gleby na wytrzymałość właściwą włókna – efekt interakcji
Źródło: opracowanie własne

Wyniki badań średniej siły zrywającej włókien (tab. 13) są adekwatne do wyników wytrzymałości właściwej, gdzie wartość parametru w większości przypadków maleje wraz ze wzrostem wilgotności gleby podczas wzrostu lnu. Natomiast wyniki badań wydłużenia (tab. 13) nie są jednoznaczne. W pierwszym roku doświadczenia dla odmiany Artemida, wydłużenie włókien wzrasta wraz ze zwiększeniem wilgotności gleby w podłożu. Natomiast dla włókien odmiany Modran oraz Sara maleje, gdzie dla kontroli oraz średniego poziomu wilgotności gleby na poziomie 35% PPW jest podobna (M35, M45 oraz S35, S45). W 2020r. dla włókien odmiany Artemida wydłużenie nieznacznie rośnie wraz ze wzrostem wilgotności gleby. Dla odmiany Modran oraz Sara najwyższe jest dla włókien pochodzących z największego stresu suszy, a najniższe dla średniego poziomu wilgotności gleby na poziomie 35% PPW. W 2021r. dla włókien odmiany Artemida oraz Sara wydłużenie maleje wraz ze wzrostem wilgotności. Dla włókien odmiany Modran,

najwyższym wydłużeniem charakteryzują się włókna (M35) pochodzące z pośredniego poziomu wilgotności gleby, a najniższym włókna z kontroli (M45).

Rośliny, które doświadczają deficytu wody aktywują liczne procesy molekularne, biochemiczne lub fizjologiczne w celu przeżycia oraz przewyciężenia skutków stresu suszy, wykorzystując strategie adaptacyjne. W analizowanych w ramach doktoratu przypadkach w celu zapewnienia optymalnego rozwoju roślin w trudnych warunkach, rośliny uruchamiają mechanizmy obronne tworząc struktury wzmacniające ich właściwości mechaniczne powodując wzrost siły zrywającej (tabela 13) i wytrzymałości właściwej włókien.

Tabela 13. Wyniki badań średniej siły zrywającej oraz wydłużenia włókien lnu dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z 2019r., 2020r., 2021r.

Symbol	2019r.				2020r.				2021r.			
	Siła zrywająca [N]	SD [N]	Wydłużenie [%]	SD [%]	Siła zrywająca [N]	SD [N]	Wydłużenie [%]	SD [%]	Siła zrywająca [N]	SD [N]	Wydłużenie [%]	SD [%]
A25	7,42	1,52	4,26	0,97	6,73	0,55	8,20	1,14	8,91	2,91	8,76	1,07
A35	7,42	0,49	4,95	1,00	6,15	2,47	8,54	1,96	7,78	1,63	7,87	0,62
A45	6,47	2,30	5,19	2,12	4,48	0,89	8,63	2,83	7,86	1,04	7,69	0,85
M25	6,80	1,07	6,91	1,70	6,05	0,94	10,31	6,35	8,21	2,29	9,06	0,45
M35	6,49	0,38	5,88	0,48	6,03	1,82	7,37	1,52	5,53	1,86	10,35	2,73
M45	6,37	0,54	5,69	0,73	6,36	1,30	7,96	1,43	5,28	0,45	7,89	0,67

Źródło: opracowanie własne

Tabela 13. Wyniki badań średniej siły zrywającej oraz wydłużenia włókien lnu dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z 2019r., 2020r., 2021r. c.d.

	2019r.				2020r.				2021r.			
Symbol	Siła zrywająca [N]	SD [N]	Wydłużenie [%]	SD [%]	Siła zrywająca [N]	SD [N]	Wydłużenie [%]	SD [%]	Siła zrywająca [N]	SD [N]	Wydłużenie [%]	SD [%]
S25	10,15	1,69	6,30	1,01	10,28	2,39	9,89	1,77	8,04	0,82	9,66	1,63
S35	6,53	1,14	4,35	1,63	7,08	0,86	8,18	0,82	7,15	1,78	8,15	0,61
S45	6,07	0,97	4,47	0,84	5,92	1,58	9,34	3,09	6,52	1,48	7,05	0,85

Źródło: opracowanie własne

4.2.5. Analiza mikroskopowa SEM włókien

Obrazy mikroskopowe SEM przekrojów poprzecznych oraz widoków wzdłużnych włókien lnu przedstawiają charakterystyczne cechy włókien łykowych. Ścianki włókna są grube, a kanał wewnętrzny zajmuje niewielką powierzchnię, często zaznaczony lokalnie lub w ogóle niewidoczny. W widoku wzdłużnym elementarne włókno lnu ma kształt cylindryczny. Powierzchnia włókna jest na ogół gładka, czasami można zaobserwować podłużne pęknięcia i szczeliny, które wskazują na obecność nieusuniętych z powierzchni włókna pektyn. Cechą charakterystyczną są widoczne zgrubienia poprzeczne i ukośne, tzw. kolanka. Zastosowany deficyt wody w okresie wzrostu roślin nie wpłynął na wygląd przekrojów poprzecznych i widoków wzdłużnych włókien. Niemniej jednak, obrazy SEM widoków wzdłużnych włókien potwierdziły wyniki masy liniowej włókien.

Włókna ekstrahowane z roślin rosnących w warunkach kontrolowanego deficytu wody w podłożu były zauważalnie cieńsze od prób kontrolnych.

Obrazy mikroskopowe SEM przekrojów poprzecznych włókien lnu oraz widoków wzdłużnych znajdują się w Załączniku nr 1.

4.2.6. Podsumowanie

Treść hipotezy szczegółowej nr 1 zakłada, że susza w okresie wegetacji lnu wpływa na wydajność włókna, średnią długość wagową, masę liniową, wskaźniki przy rozciąganiu statycznym oraz na strukturę zewnętrzną włókien lnu. Na podstawie wyników wykonanych badań, stwierdza się potwierdzenie hipotezy w przypadku czterech na pięć badanych parametrów.

Wśród wymienionych wyżej wskaźników, deficyt wody podczas wzrostu lnu pogarsza wydajność włókna, gdzie procentowa zawartość włókna długiego w słomie maleje, dla każdej testowanej odmiany lnu, wraz z nasileniem suszy. Analiza średniej długości wagowej włókien wykazała podobną zależność. Rośliny lnu potrzebują odpowiedniej ilości wody podczas wzrostu, deficyt wody hamuje wzrost roślin, stąd też długość włókien pochodzących z roślin hodowanych w warunkach stresu suszy jest istotnie niższa od długości włókna pochodzącego z optymalnych warunków wzrostu. Nie mniej jednak włókno dostarczone przez rośliny ze stresu suszy charakteryzuje się niższą masą liniową, w tym przypadku należy mówić o pozytywnym wpływie deficytu wody na ten parametr jakościowy włókna. Ocena rezultatów eksperymentu, daje podstawy do potwierdzenia odrzucenia drugiej części hipotezy szczegółowej nr 1. Niższa masa liniowa włókien dostarczonych przez rośliny wzrastające w warunkach stresu suszy jest atutem dla przemysłu włókienniczego, ponieważ umożliwia produkcję przędz o niskiej masie liniowej do wytwarzania wysokiej jakości tekstyliów. Nie mniej jednak, zbyt niska długość włókna uniemożliwiają zastosowanie mokrego systemu przędzenia dla włókna długiego, który pozwala na wytworzenie przędz lnianych o najwyższej jakości. Wskaźniki przy rozciąganiu statycznym, a dokładniej wytrzymałość właściwa włókien lnu, pochodzących z roślin poddanych stresowi suszy, osiąga wyższe wartości w porównaniu do włókien pozyskanych z roślin hodowanych

w warunkach kontrolnych. Hipoteza nie została potwierdzona w przypadku wpływu deficytu wody na strukturę zewnętrzną włókna. Na podstawie obrazów mikroskopowych SEM, stwierdzono, że deficyt wody nie wpływa na strukturę zewnętrzną włókien oraz na ich przekroje poprzeczne. Nie zauważono istotnych różnic na wykonanych mikrofotografiach.

4.3. Analiza chemiczna włókien Inu

Analiza chemiczna włókien Inu obejmowała wykonanie oznaczenia zawartości substancji woskowych i tłuszczowych oraz lignin we włóknie. Wykonanie pełnej analizy obejmującej oznaczenie celulozy, hemicelulozy oraz pektyn było niemożliwe ze względu na pozyskanie niewystarczającej ilości materiału badawczego. Hodowla Inu prowadzona w warunkach doświadczenia wazonowego wiąże się z poważnymi ograniczeniami w zakresie możliwości uprawy dużej liczby roślin, z tego powodu niemożliwe było w niniejszej pracy pozyskanie materiału badawczego w ilości pozwalającej na pełną analizę chemiczną włókna. Z tego względu przeprowadzałam badania jedynie zawartości lignin we włóknie, ponieważ lignina jako złożony aromatyczny polimer zbudowany z cząsteczek fenylopropanolu wiąże kwasy fenolowe, które mają zdolność antyoksydacyjną. Konieczność zbadania zawartości kwasów fenolowych we włóknach Inu oraz oznaczenia ich aktywności antyoksydacyjnej wynika z celu pracy, hipotezy głównej oraz trzeciej hipotezy szczegółowej. W celu wyznaczenia zawartości lignin, w pierwszej kolejności koniecznym było określenie wilgotności włókna oraz zawartości wosków i substancji tłuszczowych. Przeprowadzenie badań wilgotności materiału było niezbędnym, wstępnym etapem do określenia ilości substancji woskowych i tłuszczowych, które należało usunąć z włókna w celu oznaczenia zawartości lignin. Przeprowadzenie badań wilgotności zmielonych włókien Inu było niezbędne do określenia zawartości lignin.

4.3.1. Wyniki badań wilgotności włókien Inianych

Procentowa zawartość wilgotności prób włókien z trzech lat doświadczenia (tabela 14) kształtowała się na podobnym poziomie, który wynosił 6,93–8,17%. Wyniki badań wilgotności włókna zmielonego (tabela 15) wynosiły 5,70–7,19%. Włókno Inu jest włóknem o właściwościach hydrofilowych z łatwością absorbującym wilgoć z otoczenia. Dlatego wszystkie włókna przechowywano w tych samych warunkach w pomieszczeniu bez dostępu światła w temperaturze pokojowej $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza $45\% \pm 5\%$ w celu zminimalizowania wpływu czynników zewnętrznych na materiał badawczy.

Tabela 14. Wyniki badań wilgotności włókien lnianych

Rok	2019		2020		2021	
Symbol	Wilgotność [%]	SD [%]	Wilgotność [%]	SD [%]	Wilgotność [%]	SD [%]
A25	7,11	0,01	7,36	0,06	8,03	0,04
A35	7,29	0,14	7,28	0,07	7,86	0,15
A45	7,12	0,19	7,48	0,07	7,56	0,01
M25	6,93	0,23	7,43	0,00	7,34	0,70
M35	7,15	0,07	7,55	0,06	7,95	0,09
M45	7,17	0,21	7,42	0,04	7,82	0,01
S25	7,07	0,15	7,30	0,16	8,17	0,38
S35	7,23	0,01	7,43	0,08	8,16	0,09
S45	7,03	0,06	7,22	0,10	7,70	0,03

Źródło: opracowanie własne

Tabela 15. Wyniki badań wilgotności włókien lnianych po zmieleniu

Rok	2019		2020		2021	
Symbol	Wilgotność [%]	SD [%]	Wilgotność [%]	SD [%]	Wilgotność [%]	SD [%]
A25	5,70	0,05	6,68	0,08	7,19	0,03
A35	6,09	0,17	6,01	0,07	6,52	0,35
A45	7,09	0,48	6,89	0,28	6,49	0,01
M25	5,81	0,09	6,04	0,18	6,90	0,35
M35	6,01	0,04	6,90	0,21	6,66	0,03
M45	5,91	0,15	6,50	0,20	6,25	0,10
S25	6,39	0,13	6,64	0,20	6,92	0,12
S35	6,79	0,01	6,50	0,31	6,86	0,15
S45	6,52	0,08	6,51	0,13	6,48	0,01

Źródło: opracowanie własne

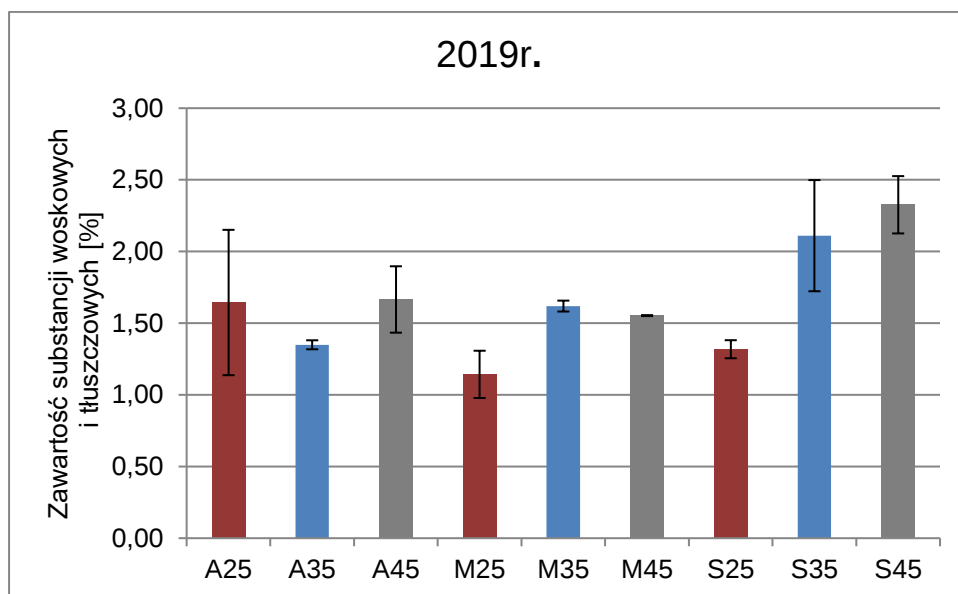
4.3.2. Wyniki badań zawartości substancji woskowych i tłuszczowych we włóknach lnianych

Procentowa zawartość substancji woskowych i tłuszczowych we włóknach pozyskanych z roślin hodowanych w trzech kolejnych latach prowadzenia doświadczenia wynosiła 1,14–2,45%.

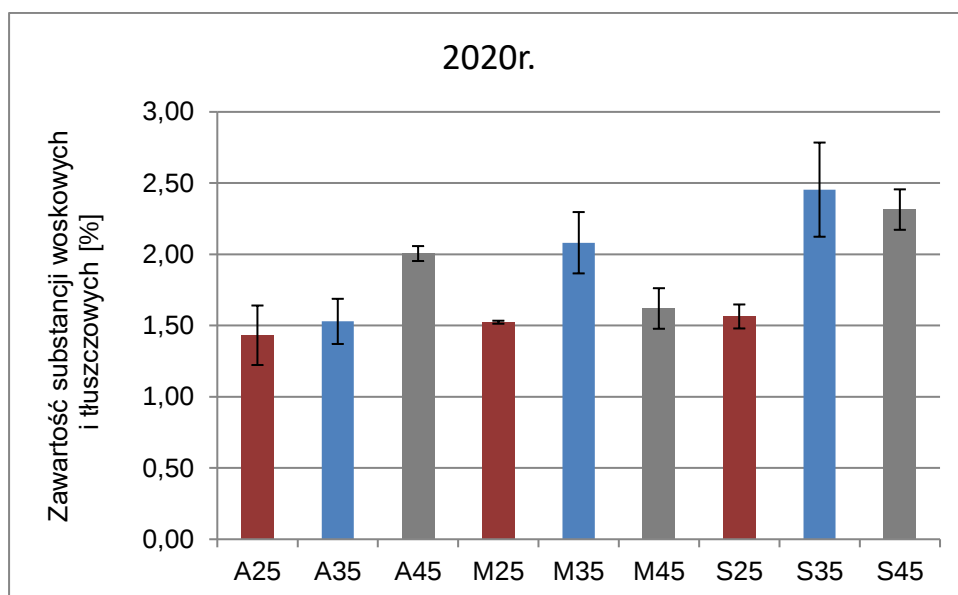
Wśród badanych prób w 2019r. (rys. 30) najwyższą zawartością substancji woskowych i tłuszczowych we włóknach charakteryzowała się odmiana Sara, rosnąca w warunkach kontroli (S45), przy czym ilość tych substancji we włóknie malała wraz ze wzrostem stresu suszy. Dla włókien odmiany Artemida oraz Modran zależności nie są jednoznaczne. Włókna, pochodzące z roślin, które rosły w warunkach pośredniej wilgotności gleby (35% PPW) dla odmiany Artemida osiągają najniższą zawartość substancji woskowych i tłuszczowych (A35), natomiast dla włókien odmiany Modran najwyższą (M35).

W 2020r. (rys. 31) dla włókien odmiany Artemida, zawartość substancji woskowych i tłuszczowych we włóknach wzrasta wraz ze wzrostem wilgotności gleby w której rosły rośliny lnu. Dla włókien odmian Modran oraz Sara, najwyższą zawartość substancji woskowych i tłuszczowych oznaczono we włóknach (M35, S35) pochodzącym z roślin, które rosły w warunkach pośredniej wilgotności gleby (35% PPW), a najniższą te, które rosły w największym stresie suszy (M25, S25).

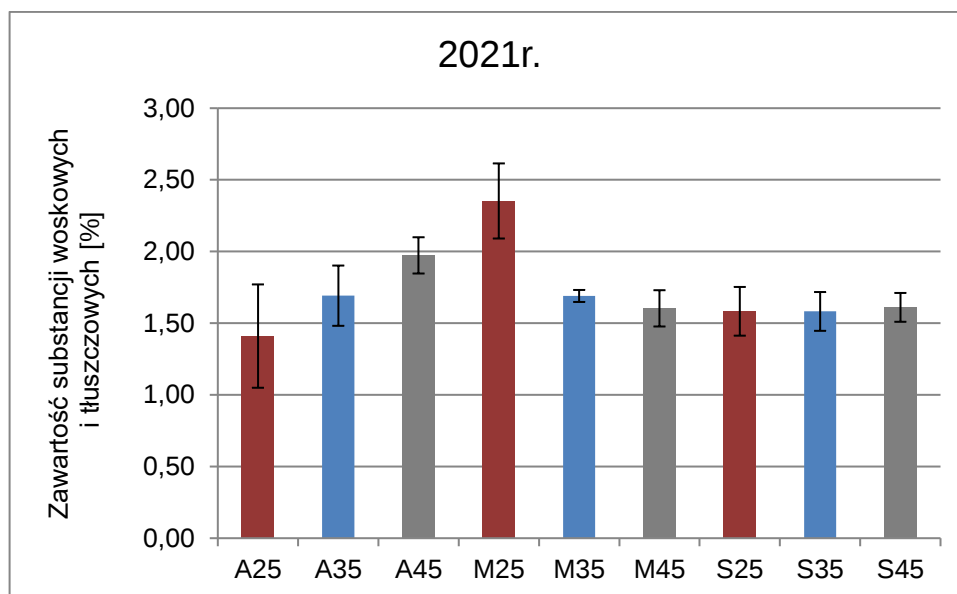
W 2021r. (rys. 32) dla odmiany Artemida zawartość substancji woskowych i tłuszczowych we włóknie wzrasta w identyczny sposób jak rok wcześniej, czyli wraz ze wzrostem wilgotności gleby w której rosły rośliny lnu. Najwyższą zawartością badanych substancji charakteryzowały się włókna odmiany Modran rosnące w warunkach największego stresu suszy (M25). Nie występowały znaczące różnice w zawartości substancji woskowych i tłuszczowych we włóknie odmiany Modran pochodzących z uprawy w warunkach kontroli (M45) oraz pośredniego poziomu wilgotności gleby (M35). Dla odmiany Sara również nie zaobserwowano istotnych różnic między zawartością badanych substancji we włóknie pochodzącym z upraw prowadzonych w różnych warunkach wilgotności gleby.



Rys. 30. Wyniki badań procentowej zawartości substancji woskowych i tłuszczowych we włóknie dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z 2019r.
Źródło: opracowanie własne



Rys. 31. Wyniki badań procentowej zawartości substancji woskowych i tłuszczowych we włóknie dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z 2020r.
Źródło: opracowanie własne



Rys. 32. Wyniki badań procentowej zawartości substancji woskowych i tłuszczowych we włóknie dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z 2021r.
Źródło: opracowanie własne

Wyniki statystycznej oceny danych z wykorzystaniem wieloczynnikowego modelu analizy wariancji w schemacie mieszanym ujawniły istotne statystycznie różnice odnośnie zawartości substancji woskowych i tłuszczowych we włóknach lnianych (tabela 16, tabela 17). Efekt główny stopnia wilgotności gleby podczas wzrostu roślin na zawartość substancji woskowych i tłuszczowych we włóknie w przypadku 45% PPW był istotnie wyższy niż w przypadku 25% PPW gleby.

Tabela 16. Wpływ odmiany lnu i stopnia wilgotności gleby na zawartość substancji woskowych i tłuszczowych we włóknie mierzony w trzech kolejnych latach: część I (efekty główne)

		<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2	<i>Post-hoc</i>
A	2019	18	1,64	0,41	6,63	0,007	0,087	A < B**
B	2020	18	1,83	0,39				
C	2021	18	1,72	0,31				
I	Artemida	18	1,63	0,29	3,94	0,059	0,174	n.i.
II	Modran	18	1,69	0,35				
III	Sara	18	1,87	0,44				
a	25%	18	1,55	0,37	6,27	0,020	0,278	a < c*
b	35%	18	1,79	0,37				
c	45%	18	1,85	0,32				

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

Źródło: opracowanie własne

Tabela 17. Wpływ odmiany lnu i stopnia wilgotności gleby na zawartość substancji woskowych i tłuszczowych we włóknie mierzony w trzech kolejnych latach: część II (efekty interakcji 2 rzędu)

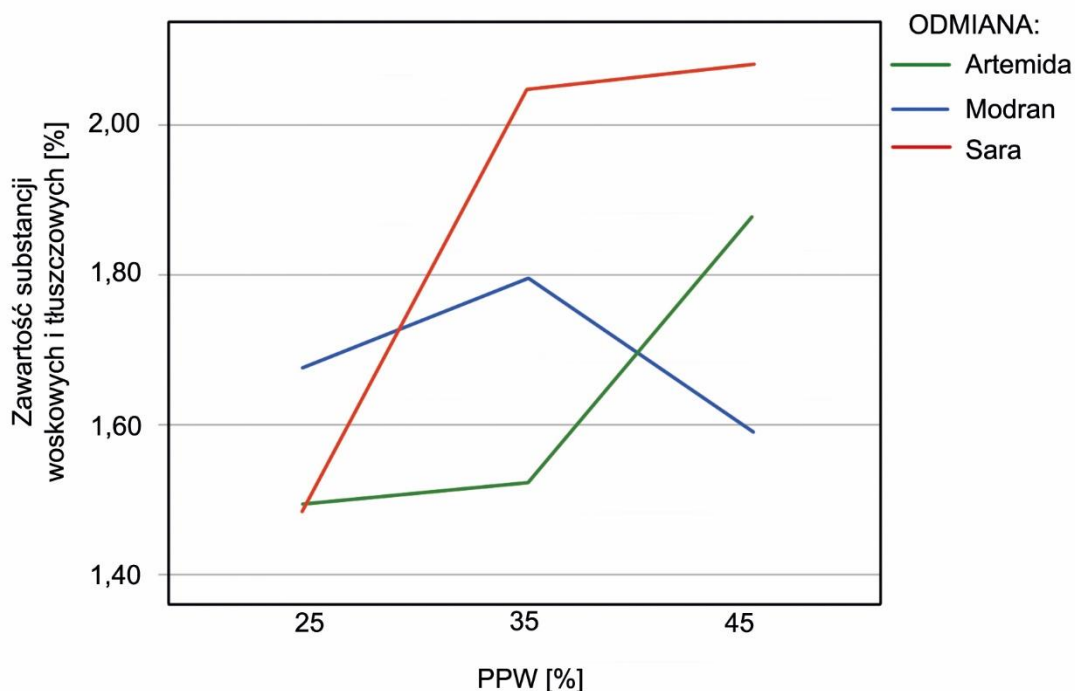
		<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2	<i>Post-hoc</i>
I.A	Artemida 2019	6	1,55	0,29	10,54	0,001	0,276	II.A < II.B**
I.B	Artemida 2020	6	1,66	0,30				II.A < II.C**
I.C	Artemida 2021	6	1,69	0,32				III.A < III.B
II.A	Modran 2019	6	1,44	0,24				III.C < III.A*
II.B	Modran 2020	6	1,74	0,29				III.C < III.B**
II.C	Modran 2021	6	1,88	0,39				I.B < III.B**
III.A	Sara 2019	6	1,92	0,51				II.A < III.A*
III.B	Sara 2020	6	2,11	0,46				II.B < III.B*
III.C	Sara 2021	6	1,59	0,11				
I.a	Artemida 25%	6	1,50	0,31	3,93	0,041	0,349	III.a < III.b*
I.b	Artemida 35%	6	1,52	0,19				III.a < III.c*
I.c	Artemida 45%	6	1,88	0,21				I.b < III.b*
II.a	Modran 25%	6	1,68	0,57				II.c < III.c*
II.b	Modran 35%	6	1,80	0,24				
II.c	Modran 45%	6	1,59	0,09				
III.a	Sara 25%	6	1,49	0,16				
III.b	Sara 35%	6	2,05	0,46				
III.c	Sara 45%	6	2,08	0,38				
a.A	25% 2019	6	1,37	0,33	7,93	0,001	0,207	a.A < a.C*
a.B	25% 2020	6	1,50	0,12				a.B < a.C
a.C	25% 2021	6	1,78	0,50				b.A < b.B**
b.A	35% 2019	6	1,69	0,39				b.C < b.B*
b.B	35% 2020	6	2,02	0,46				a.A < c.A*
b.C	35% 2021	6	1,66	0,13				a.B < b.B**
c.A	45% 2019	6	1,85	0,40				a.B < c.B**
c.B	45% 2020	6	1,98	0,32				
c.C	45% 2021	6	1,73	0,21				

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

Źródło: opracowanie własne

Efekty interakcyjne okazały się istotne statystycznie. W każdym kolejnym roku doświadczenia włókna odmiany Sara cechowały się wyższą zawartością substancji woskowych i tłuszczowych niż Artemida i Modran - wyjątek stanowił 2021r. Efekt interakcji odmiany lnu i poziomu wilgotności gleby wykazał, że w przypadku włókien odmiany Sara wraz ze wzrostem wilgotności gleby podczas uprawy roślin, wzrastał poziom zawartości substancji woskowych i tłuszczowych we włóknach, ponadto w obrębie warunku wilgotności gleby na poziomie 35% PPW,

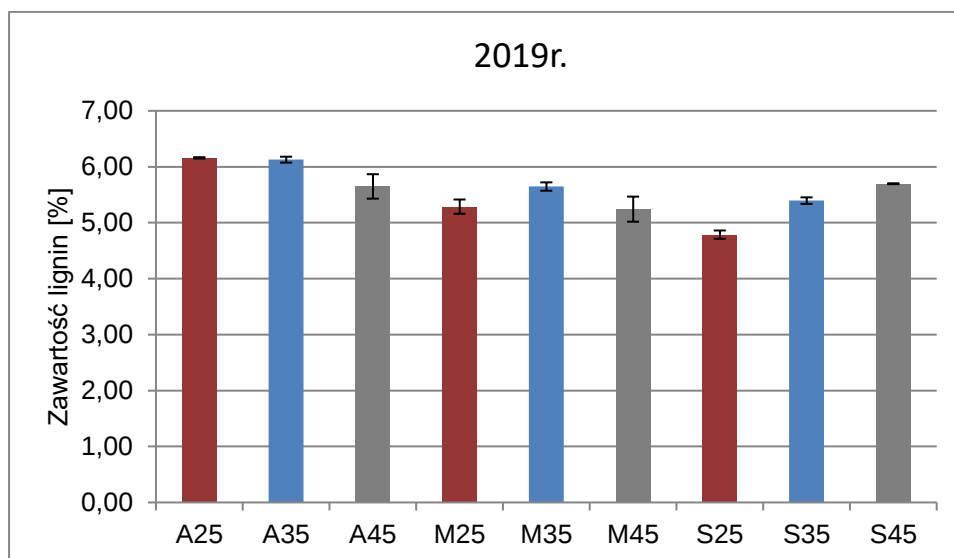
zawartość substancji woskowych i tłuszczowych we włóknach dla odmiany Sara była wyższa niż we włóknach odmiany Artemida, a w przypadku wilgotności 45% PPW gleby wyższa niż odmiany Modran (rys. 33).



Rys. 33. Wpływ odmiany lnu i poziomu wilgotności gleby na zawartość substancji woskowych i tłuszczowych we włóknie – efekt interakcji
Źródło: opracowanie własne

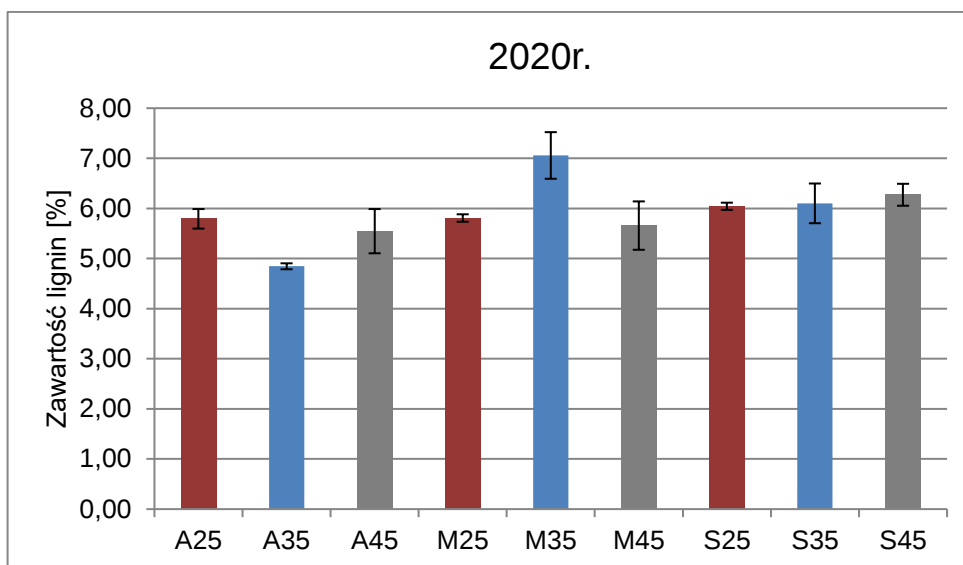
4.3.3. Wyniki badań zawartości lignin we włóknach lnianych

Zawartość lignin we włóknie pochodzącym ze wszystkich badanych odmian lnu w 2019r. (rys. 34) kształtuje się na poziomie 4,79–6,16%. Najwyższą wartość przyjmuje dla włókien odmiany Artemida rosnącej w największym stresie suszy (A25). Wartość nieznacznie spada wraz ze wzrostem wilgotności w glebie. Wśród odmiany Modran, największą zawartością ligniny charakteryzują się włókna pochodzące z roślin uprawianych w warunkach pośredniego poziomu wilgotności gleby (35% PPW). Natomiast dla odmiany Sara, parametr ten wzrasta wraz ze wzrostem wilgotności gleby i osiąga najwyższą wartość dla kontroli (S45).



Rys. 34. Wyniki badań procentowej zawartości lignin we włóknie dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z upraw w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019r.
Źródło: opracowanie własne

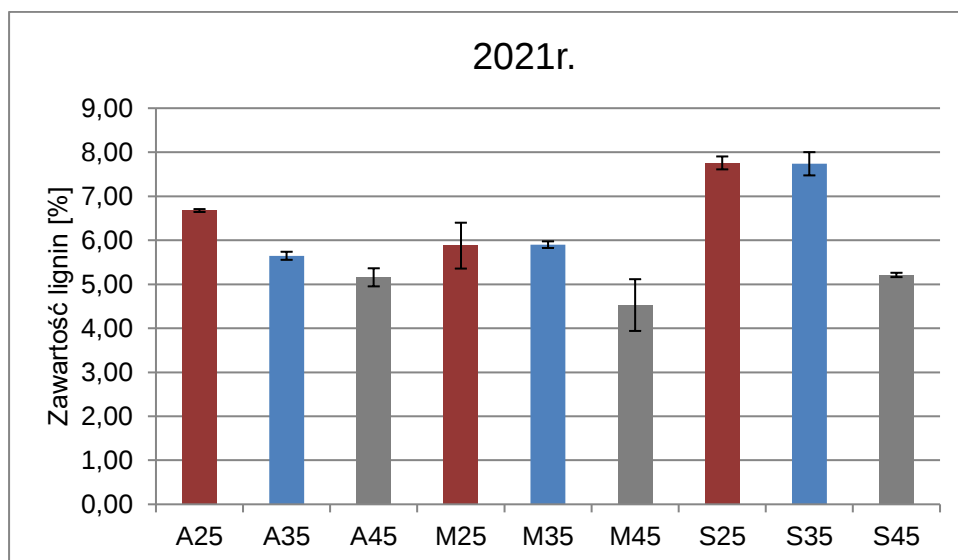
Zawartość lignin badana we wszystkich rodzajach włókna w 2020r. (rys. 35) kształtuje się na poziomie 4,85–7,06%. Dla odmiany Artemida najwyższą wartość osiągają włókna pochodzące z uprawy w warunkach najwyższego stresu suszy (A25), nieznacznie mniej lignin występuje w kontroli (A45). Odmiana Modran osiąga najwyższą wartość lignin we włóknach pochodzących z roślin rosnących w pośrednim poziomie wilgotności gleby 35% PPW (M35). Zawartość lignin we włóknie roślin wzrastających w warunkach kontroli (M45) oraz w stresie suszy (M25) jest na podobnym poziomie. Dla odmiany Sara, wilgotność gleby podczas wzrostu rośliny nie wpływa na zawartość lignin we włóknach.



Rys. 35. Wyniki badań procentowej zawartości lignin we włóknie dla odmian Artemida, Modran oraz Sara wzrastających w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2020r.
Źródło: opracowanie własne

Zawartość lignin we wszystkich rodzajach badanego włókna w 2021r. (rys. 36) kształtuje się na poziomie 4,53–7,76%. Dla odmiany Artemida, najwyższą zawartością charakteryzują się włókna pochodzące z roślin rosnących w warunkach najwyższego stresu suszy (A25), przy czym zawartość lignin spada wraz ze wzrostem wilgotności gleby. Dla odmiany Modran oraz Sara zależności są podobne, przy czym nie istnieją zauważalne różnice dla stresu suszy oraz pośredniej wilgotności gleby na poziomie 35% PPW. Natomiast, zawartość lignin we włóknie spada wraz ze wzrostem wilgotności gleby (M45, S45).

Należy podkreślić, iż w 2021r. zawartość lignin we włóknie pochodzącym ze wszystkich odmian Inu badanych w ramach pracy doktorskiej jest najniższa dla roślin wzrastających w warunkach stresu suszy (A25, M25, S25) w porównaniu do swoich odpowiedników uprawianych w warunkach 35% oraz 45% PPW. Taką regularność zaobserwowano jedynie w roku 2021.



Rys. 36. Wyniki badań procentowej zawartości lignin we włóknie dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z upraw w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2021r.
Źródło: opracowanie własne

Analiza statystyczna wykazała, że odmiana Inu w sposób istotny statystycznie wpływa na zawartość lignin we włóknach. Włókna odmiany Sara cechowały się istotnie wyższą zawartością lignin niż pozostałe odmiany. Wystąpił również istotny statystycznie efekt główny poziomu wilgotności gleby podczas uprawy roślin. W przypadku 45% PPW zawartość lignin we włóknach była istotnie mniejsza w porównaniu do 25% PPW i 35% PPW gleby (tabela 18).

Tabela 18. Wpływ odmiany Inu i stopnia wilgotności gleby na zawartość lignin we włóknach mierzony w trzech kolejnych latach: część I (efekty główne)

		<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2	<i>Post-hoc</i>
A	2019	18	5,55	0,43	22,93	0,001	0,101	A < B**
B	2020	18	5,90	0,62				A < C**
C	2021	18	6,05	1,11				
I	Artemida	18	5,73	0,55	10,60	0,004	0,210	I < III*
II	Modran	18	5,67	0,71				II < III**
III	Sara	18	6,11	1,02				
a	25%	18	6,02	0,83	21,90	0,001	0,434	c < a**
b	35%	18	6,05	0,86				c < b**
c	45%	18	5,44	0,53				

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

Źródło: opracowanie własne

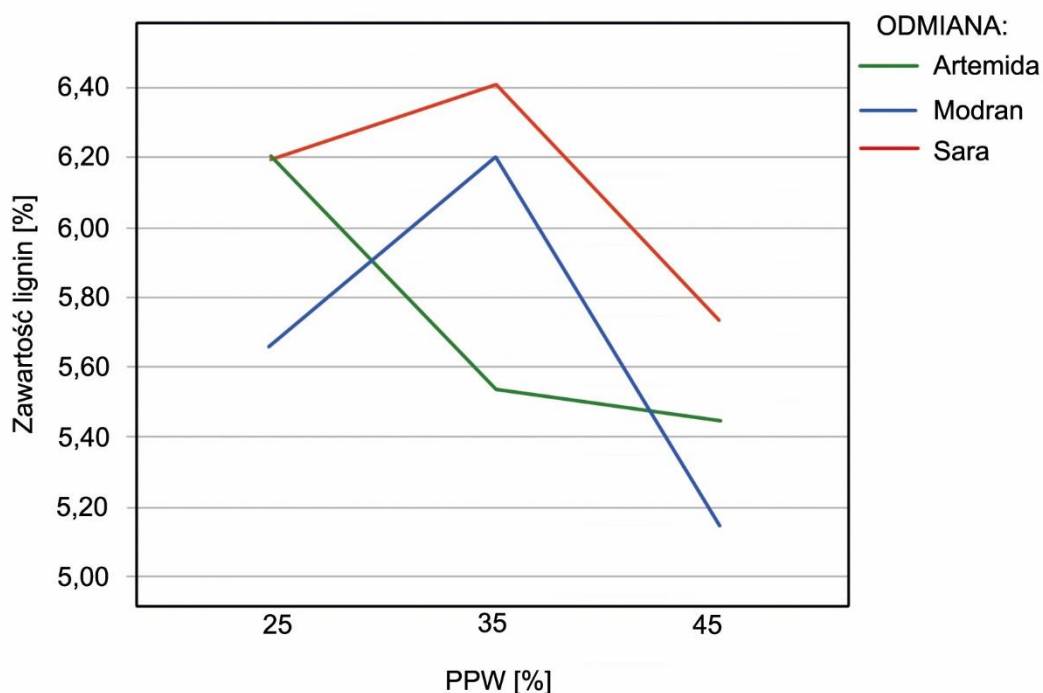
Istotne statystycznie były również wszystkie efekty interakcji (tabela 19). Wilgotność gleby na poziomie 25% PPW wpłynęła na większą zawartość lignin we włóknie dla odmiany Artemida w porównaniu do 35% i 45% PPW. Natomiast w przypadku odmiany Modran i Sara wilgotność gleby na poziomie 35% PPW sprzyjała wyższej zawartości lignin we włóknach niż 25% i 45% PPW. W przypadku 25% i 45% PPW gleby włókna odmiany Modran cechowały się najniższym poziomem zawartości lignin w porównaniu do dwóch pozostałych odmian. Z kolei w obrębie 35% PPW włókna odmiany Artemida wykazywały istotnie mniejszą średnią zawartość lignin niż Sara i Modran (rys. 37).

Tabela 19. Wpływ odmiany lnu i stopnia wilgotności gleby na zawartość lignin we włóknach mierzoną w trzech kolejnych latach: część II (efekty interakcji 2 rzędu)

		<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2	<i>Post-hoc</i>
I.A	Artemida 2019	6	5,98	0,28	42,80	0,001	0,377	I.B < I.A**;
I.B	Artemida 2020	6	5,39	0,49				I.B < I.C;
I.C	Artemida 2021	6	5,83	0,70				II.A < II.B**;
II.A	Modran 2019	6	5,39	0,23				II.C < II.B**;
II.B	Modran 2020	6	6,18	0,75				III.A < III.B**;
II.C	Modran 2021	6	5,43	0,79				III.A < III.C**;
III.A	Sara 2019	6	5,29	0,41				III.B < III.C**;
III.B	Sara 2020	6	6,14	0,23				I.B < II.B**;
III.C	Sara 2021	6	6,90	1,31				I.C < III.C**;
I.a	Artemida 25%	6	6,21	0,41	6,73	0,009	0,267	II.A < II.C**;
I.b	Artemida 35%	6	5,54	0,58				III.A < III.C**;
I.c	Artemida 45%	6	5,45	0,33				II.A < I.A**;
II.a	Modran 25%	6	5,66	0,38				II.C < III.C**;
II.b	Modran 35%	6	6,20	0,71				III.A < I.A**;
II.c	Modran 45%	6	5,14	0,62				III.A < I.A**;
III.a	Sara 25%	6	6,20	1,33				III.C**;
III.b	Sara 35%	6	6,41	1,09				III.A < I.A**;
III.c	Sara 45%	6	5,73	0,49				III.C**;
a.A	25% 2019	6	5,41	0,62	34,59	0,001	0,305	I.B < I.A**;
a.B	25% 2020	6	5,88	0,16				I.B < I.C;
a.C	25% 2021	6	6,77	0,88				II.A < II.B**;
b.A	35% 2019	6	5,72	0,34				II.C < II.B**;
b.B	35% 2020	6	6,00	1,03				III.A < III.B**;
b.C	35% 2021	6	6,43	1,03				III.A < III.C**;
c.A	45% 2019	6	5,53	0,26				I.B < II.B**;
c.B	45% 2020	6	5,83	0,47				I.C < III.C**;
c.C	45% 2021	6	4,96	0,44				III.C**;

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

Źródło: opracowanie własne



Rys. 37. Wpływ odmiany lnu i poziomu wilgotności gleby na zawartość lignin we włóknie – efekt interakcji

Źródło: opracowanie własne

4.3.4. Analiza spektroskopii w podczerwieni FTIR-ATR włókien lnianych

Analiza spektrofotometryczna FTIR-ATR została wykonana w celu uzyskania informacji na temat struktury molekularnej wierzchniej warstwy włókien lnianych, m.in. w zamiarze zidentyfikowania związków oraz potwierdzenia obecności kwasów fenolowych. Widma w podczerwieni badanych włókien służą do identyfikacji zakresów absorpcji reprezentujących drgania takich grup funkcyjnych jak: O-H, C=O, C=C, COO, C-H, CH₂, CH₃, COC, które pochodzą od składników chemicznych we włóknie (Konczewicz i in. 2017). Analizując wpływ poziomu suszy oraz odmianę lnu z danego roku, nie zauważono istotnych różnic między występowaniem pików w danym zakresie liczby falowej. Porównując wykresy absorpcji wykonane dla włókna pozyskanego w kolejnych latach doświadczenia, dostrzeżono jedynie niewielkie przesunięcia określonych pików, które mogą odpowiadać, za drgania tego samego rodzaju grup funkcyjnych.

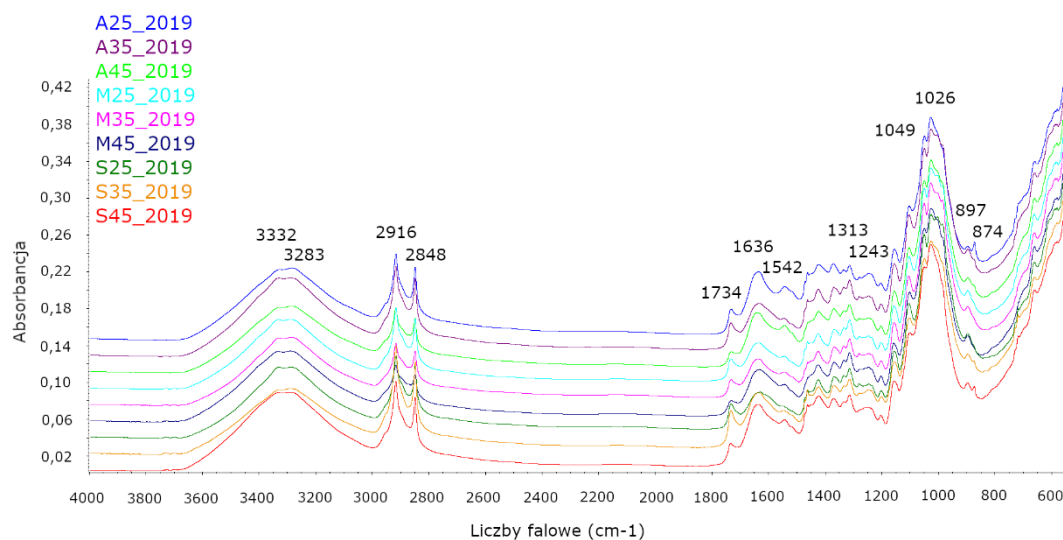
Ocena składu chemicznego, na podstawie widm w podczerwieni, włókien lnianych jest skomplikowana do zweryfikowania ze względu na ich

wieloskładnikową naturę i występowanie tych samych grup funkcyjnych w wielu składnikach chemicznych włókna, takich jak celuloza, hemiceluloza, pektyny, ligniny oraz substancje woskowe i tłuszczowe. Analizę spektralną przeprowadzono w kontekście pełnej charakterystyki chemicznej włókien lnianych. Ze względu na charakter doświadczenia wazonowego, pozyskano niewystarczającą ilość włókna, zatem wykonanie pełnej analizy chemicznej z wykorzystaniem tradycyjnych metod było niemożliwe. Na podstawie przeprowadzonych badań w podczerwieni (rys. 38, rys. 39, rys. 40) wykazano, że włókna odmian: Artemida, Modran oraz Sara, pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z 2019r. 2020r. oraz 2021r. wykazują absorpcję w zakresie:

- ok. 3300–3600 cm^{-1} szerokie pasmo drgań rozciągających OH grupy hydroksylowej, która występuje w celulozie, głównym składniku włókien lnianych, jak i w hemicelulozie, pektynie oraz woskach i tłuszczach,
- ok. 2800–3000 cm^{-1} pasma drgań CH oraz CH_2 grup alifatycznych,
- ok. 1700–1750 cm^{-1} pasma drgań C=O grupy karbonylowej, które są charakterystyczne dla kwasów organicznych, ketonów oraz aldehydów, a we włóknach lnianych występują w ligninie, pektynie oraz woskach i tłuszczach,
- ok. 1500–1600 cm^{-1} , drgania rozciągające C=C występujące w pierścieniu aromatycznym, które są charakterystyczne dla ligniny,
- ok. 1627–1637 cm^{-1} pasma drgań OH, pochodzące od wody zaadsorbowanej przez włókno,
- ok. 1050–1150 cm^{-1} pasma rozciągające drgań COC grupy eterowej, które występują w celulozie, hemicelulozie oraz pektynie.

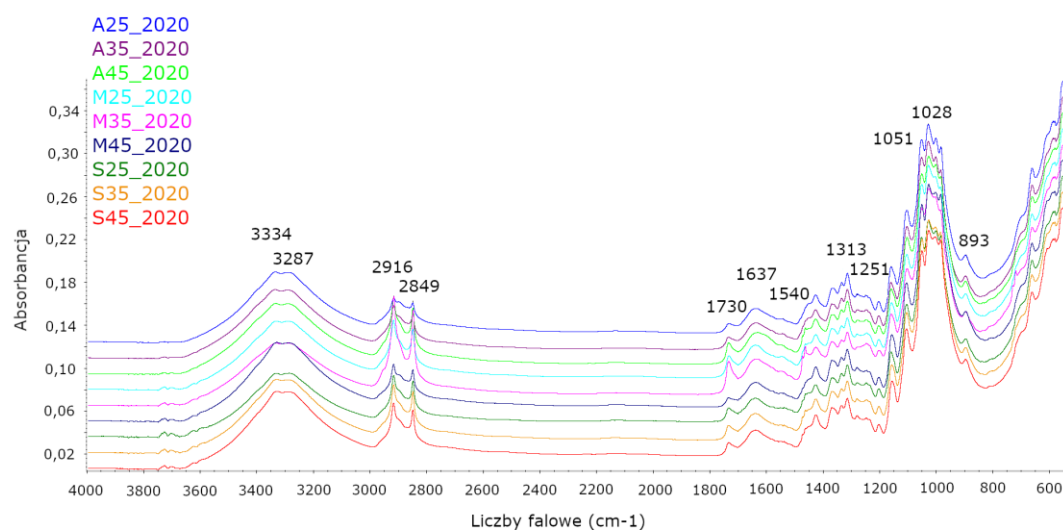
Analiza pasm drgań dla kwasów fenolowych możliwa jest do zidentyfikowania w oparciu o występowanie drgań rozciągających grupy fenolowej Ar-OH występującej w ligninie. Wynika to z faktu, że kwasy fenolowe są ekstrahowane z ligniny. Oddzielenie spektrofotometryczne poszczególnych związków chemicznych włókna nie jest możliwe z powodu występowania identycznych grup funkcyjnych w różnych składnikach włókna. Analiza widm włókien ze wszystkich lat doświadczenia, odmian oraz zastosowanego poziomu PPW

pozwoili określić występowanie wspólnych pasm w zakresie długości fali jedynie z niewielkimi przesunięciami (tabela 20).



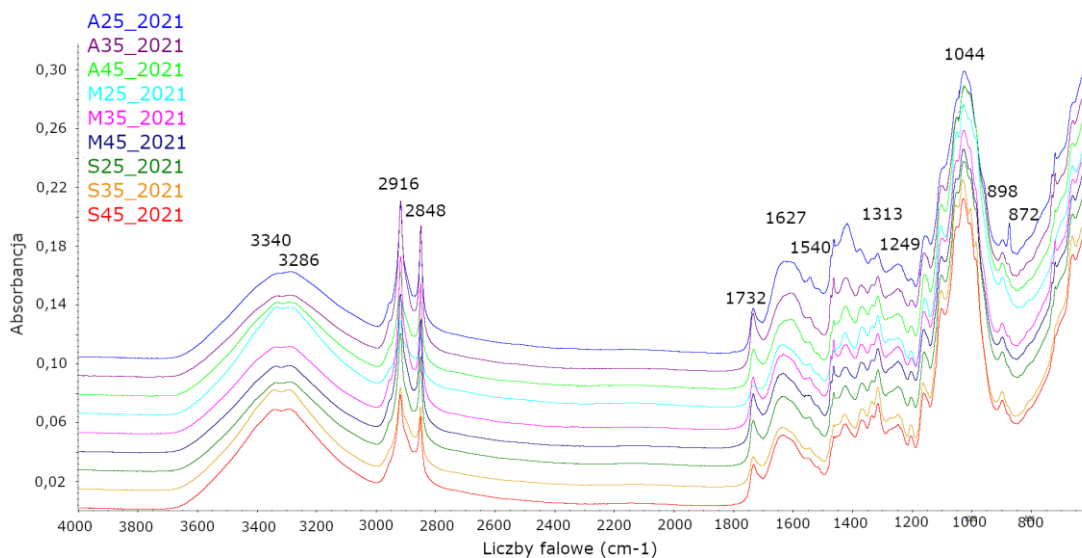
Rys. 38. Widma FTIR-ATR włókien Inianych, odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z upraw w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019r.

Źródło: opracowanie własne



Rys. 39. Widma FTIR-ATR włókien Inianych, odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z upraw w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2020r.

Źródło: opracowanie własne



Rys. 40. Widma FTIR-ATR włókien Inianych, odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z upraw w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2021r.

Źródło: opracowanie własne

Tab. 20. Charakterystyka rodzaju drgań oraz grup funkcyjnych dla danego zakresu liczb falowych widm FTIR-ATR włókien pochodzących ze wszystkich badanych odmian Inu uprawianych w wytypowanych do doświadczenia zróżnicowanych warunkach wilgotności gleby w trzyletnim okresie trwania eksperymentu

Zakres liczb falowych	Rodzaj drgań	Grupa funkcyjna	Występowanie
od 3332 do 3340 cm^{-1}	rozciągające	OH	celuloza, hemiceluloza, lignina, pektyna
3287 do 3283 cm^{-1}			
2916 cm^{-1}	rozciągające	CH, CH_2	celuloza, hemiceluloza, lignina, pektyna, woski i tłuszcze
2848 cm^{-1}			
1734 cm^{-1} do 1730 cm^{-1}	rozciągające	C=O	lignina, pektyna, woski i tłuszcze
od 1637 cm^{-1} do 1627 cm^{-1}	rozciągające	OH	woda zaadsorbowana

Źródło: opracowanie własne

Tab. 20. Charakterystyka rodzaju drgań oraz grup funkcyjnych dla danego zakresu liczb falowych widm FTIR-ATR włókien pochodzących ze wszystkich badanych odmian *Inu* uprawianych w wytypowanych do doświadczenia zróżnicowanych warunkach wilgotności gleby w trzyletnim okresie trwania eksperymentu c.d.

Zakres liczb falowych	Rodzaj drgań	Grupa funkcyjna	Występowanie
od 1542 cm ⁻¹ do 1539 cm ⁻¹	Rozciągające	C=C	lignina
1313 cm ⁻¹	nożycowe	CH ₂	celuloza, hemiceluloza
od 1250 cm ⁻¹ do 1243 cm ⁻¹	deformacyjne	OH	celuloza, hemiceluloza
od 1051 cm ⁻¹ do 1044 cm ⁻¹	zginające	COC	celuloza, hemiceluloza, pektyny
od 898 cm ⁻¹ do 872 cm ⁻¹	rozciągające	wiązanie β-glikozydowe	celuloza, hemiceluloza, pektyny

Źródło: opracowanie własne

4.3.5. Podsumowanie

Treść hipotezy szczegółowej nr 2 zakłada, że susza w okresie wegetacji *Inu* wpływa na skład chemiczny włókien *Inianych*, w szczególności na zawartość lignin oraz substancji woskowych i tłuszczowych. Włókna przebadano pod względem wilgotności, zawartości substancji woskowych i tłuszczowych, lignin oraz dokonano analizy spektroskopii w podczerwieni w celu oceny struktury molekularnej wierzchniej warstwy włókien.

Wilgotność włókien była niezbędnym parametrem, potrzebnym do wykonania kolejnych analiz chemicznych. Tożsamy sposób przechowywania włókien wykluczył wpływ warunków zewnętrznych na wilgotność prób, a wyniki badań wykazały, że parametr ten nie różni się znacząco pomiędzy danymi próbami. Analiza statystyczna zawartości substancji woskowych i tłuszczowych wykazała, wraz ze wzrostem suszy maleje ilość tych substancji dla odmiany *Sara* oraz

Artemida. Badania odmiany Modran wykazały odwrotną zależność. Zawartość lignin we włóknach Inu wpływa negatywnie na ich jakość, może powodować obniżenie wytrzymałości właściwej, sprężystości oraz zmniejszenie podzielności włókien. Analiza statystyczna udowodniła, że susza wpływa na wzrost zawartości lignin we włóknach, co ma negatywny wpływ na jakość i przędlivość włókna. Przeprowadzona analiza spektralna FTIR-ATR wykazała pasma drgań grup funkcyjnych, które pochodzą od składników chemicznych we włóknie: celulozy, hemicelulozy, pektyn, lignin oraz wosków i tłuszczów, z niewielkimi przesunięciami na przestrzeni lat doświadczenia. Jednak w tym przypadku nie wykazano istotnych różnic, które mogłyby świadczyć o wpływie suszy na analizę spektralną FTIR-ATR włókien Inu. Wyniki przeprowadzonych badań i analizy statystycznej pozwalają na sformułowanie wniosku, że hipoteza 2 została potwierdzona w zakresie wpływu poziomu wilgotności gleby na zawartość lignin we włóknie.

4.4. Analiza aktywności biologicznej włókien Inu

4.4.1. Zawartość kwasów fenolowych we włóknach Inianych

Właściwości antyoksydacyjne substancji są ściśle związane z zawartością kwasów fenolowych, na które ma wpływ ich budowa chemiczna. Liczba grup hydroksylowych oraz ich położenie w pierścieniu aromatycznym oddziałuje na aktywność tych związków. Kwasy, których podstawniki są zlokalizowane w pozycji *orto*- lub *para*- wykazują najsilniejsze działanie przeciwutleniające (Staszek 2012).

Ze względu na brak powtarzalności wyników w kolejnych latach, próby z każdego roku zostały ocenione indywidualnie:

Wnioski dla wyników badania zawartości kwasów fenolowych we włóknie Inu pozyskanym w 2019r. (tabela 21):

- kwas syringowy nie wystąpił lub występował poniżej poziomu detekcji, który wynosił $<0,0018$ mg/ml, we włóknach Inianych rosnących w stresie suszy oraz kontroli,
- kwas synapinowy nie wystąpił lub występował poniżej poziomu detekcji, który wynosił $<0,0003$ mg/ml, we włóknach Inianych rosnących w stresie suszy oraz kontroli,
- największą zawartością kwasu *p*-kumarowego charakteryzowały się włókna odmiany Artemida, które pochodziły z kontroli (A45),
- kwas *p*-kumarowy nie wystąpił lub występował poniżej poziomu detekcji, który wynosił $<0,0022$ mg/ml we włóknach odmiany Artemida dla 35% PPW (A35),
- dla odmiany Modran, zarejestrowano tylko zawartość kwasu *p*-kumarowego dla włókien pochodzących z upraw w prowadzonych w największym stresie suszy (M25),
- dla odmiany Sara, największa ilość kwasu *p*-kumarowego występowała we włóknie pochodzącym z upraw w stresie suszy i malała wraz ze wzrostem wilgotności gleby, przy czym dla kontroli nie wystąpiła lub wystąpiła poniżej poziomu detekcji, który wynosił $<0,0022$ mg/ml,

- włókna pochodzące z 2019r. charakteryzowały się największą zawartością kwasu ferulowego, wśród badanych kwasów,
- dla odmiany Artemida, zawartość kwasu ferulowego we włóknach wzrasta wraz ze wzrostem wilgotności gleby w której rośliny Inu rosły,
- dla odmiany Modran oraz Sara, zawartość kwasu ferulowego we włóknach występuje na podobnym poziomie (0,602–0,705 mg/100 g), przy czym najwyższe wartości osiąga dla włókien odmiany Modran pochodzących z kontroli (M45) oraz odmiany Sara pochodzących z upraw w warunkach największego stresu suszy (S25).

Tabela 21. Zawartość kwasów fenolowych we włóknach Inianych odmian Artemida, Modran oraz Sara uprawianych w warunkach kontroli oraz stresu suszy w 2019r.

2019r.								
Symbol	Zawartość kwasu syringowego [mg/100g]	SD [mg/100g]	Zawartość kwasu synapinowego [mg/100g]	SD [mg/100g]	Zawartość kwasu p-kumarowego [mg/100g]	SD [mg/100g]	Zawartość kwasu ferulowego [mg/100g]	SD [mg/100g]
A25	<0,0018 mg/ml	-	<0,0003 mg/ml	-	0,017	0,003	0,709	0,019
A35	<0,0018 mg/ml	-	<0,0003 mg/ml	-	<0,0022 mg/ml	-	0,846	0,083
A45	<0,0018 mg/ml	-	<0,0003 mg/ml	-	0,034	0,002	1,174	0,059
M25	<0,0018 mg/ml	-	<0,0003 mg/ml	-	0,006	0,000	0,637	0,010
M35	<0,0018 mg/ml	-	<0,0003 mg/ml	-	<0,0022 mg/ml	-	0,602	0,028
M45	<0,0018 mg/ml	-	<0,0003 mg/ml	-	<0,0022 mg/ml	-	0,705	0,024
S25	<0,0018 mg/ml	-	<0,0003 mg/ml	-	0,010	0,001	0,685	0,005
S35	<0,0018 mg/ml	-	<0,0003 mg/ml	-	0,006	0,001	0,653	0,050
S45	<0,0018 mg/ml	-	<0,0003 mg/ml	-	<0,0022 mg/ml	-	0,628	0,009

Źródło: opracowanie własne

Wnioski dla wyników badań zawartości kwasów fenolowych we włóknach pochodzących z badanych odmian Inu wzrastającego w różnych warunkach wilgotności gleby w 2020r. (tabela 22):

- włókna pochodzące ze wszystkich badanych odmian Inu uprawianego w zróżnicowanych warunkach wilgotności gleby w 2020r. charakteryzowały się brakiem zawartości kwasu syryngowego, synapinowego oraz ferulowego lub występowaniem wyżej wymienionych kwasów poniżej poziomu detekcji,
- zarejestrowano zawartość tylko kwasu *p*-kumarowego, z wyjątkiem włókien odmiany Artemida, które pochodziły z kontroli (A45) oraz odmiany Sara, które pochodziły z upraw w warunkach największego stresu suszy (S25),
- dla odmiany Artemida, różnice zawartości kwasu *p*-kumarowego we włóknach pochodzących z największego stresu suszy (A25) oraz włóknach pochodzących od roślin uprawianych w warunkach pośredniej wilgotności gleby (A35) nie były znaczące,
- dla odmiany Modran, najwyższa zawartość kwasu *p*-kumarowego występowała we włóknach pochodzących z hodowli prowadzonej w warunkach największego stresu suszy (M25),
- dla odmiany Modran oraz Sara, różnice wilgotności gleby na poziomie 35% PPW oraz kontroli (45% PPW) nie wpłynęły na zawartość kwasu *p*-kumarowego we włóknie.

Tabela 22. Zawartość kwasów fenolowych we włóknach Inianych odmian Artemida, Modran oraz Sara uprawianych w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2020r.

2020r.								
Symbol	Zawartość kwasu syryngowego [mg/100g]	SD [mg/100g]	Zawartość kwasu synapinowego [mg/100g]	SD [mg/100g]	Zawartość kwasu p-kumarowego [mg/100g]	SD [mg/100g]	Zawartość kwasu ferulowego [mg/100g]	SD [mg/100g]
A25	<0,0018 mg/ml	-	<0,0003 mg/ml	-	0,037	0,000	<0,001 mg/ml	-
A35	<0,0018 mg/ml	-	<0,0003 mg/ml	-	0,039	0,001	<0,001 mg/ml	-
A45	<0,0018 mg/ml	-	<0,0003 mg/ml	-	<0,0002 mg/ml	-	<0,001 mg/ml	-
M25	<0,0018 mg/ml	-	<0,0003 mg/ml	-	0,050	0,003	<0,001 mg/ml	-
M35	<0,0018 mg/ml	-	<0,0003 mg/ml	-	0,039	0,000	<0,001 mg/ml	-
M45	<0,0018 mg/ml	-	<0,0003 mg/ml	-	0,039	0,000	<0,001 mg/ml	-
S25	<0,0018 mg/ml	-	<0,0003 mg/ml	-	<0,0002 mg/ml	-	<0,001 mg/ml	-
S35	<0,0018 mg/ml	-	<0,0003 mg/ml	-	0,040	0,001	<0,001 mg/ml	-
S45	<0,0018 mg/ml	-	<0,0003 mg/ml	-	0,039	0,000	<0,001 mg/ml	-

Źródło: opracowanie własne

Wnioski dla wyników badań zawartości kwasów fenolowych we włóknach pochodzących z badanych odmian Inu wzrastającego w różnych warunkach wilgotności gleby w 2021r. (tabela 23):

- włókna pochodzące z upraw badanych odmian Inu prowadzonych w 2021r. wyróżniały się największą zawartością kwasów fenolowych, w porównaniu do prób z poprzednich lat,
- zawartość kwasu syryngowego była na bardzo niskim poziomie dla wszystkich prób, a we włóknach odmiany Artemida, które pochodziły z największego stresu suszy (A25) kwas syryngowy nie występował,
- dla odmiany Artemida, zawartość kwasu syryngowego była niższa dla kontroli (A45) niż dla włókien pochodzących z pośredniego poziomu wilgoci w glebie (A35),

- dla odmiany Modran najwyższą zawartością kwasu syringowego charakteryzowały się włókna pochodzące z pośredniego poziomu wilgoci w glebie (M35), a dla kontroli (M45) oraz najwyższego stresu suszy (M25) osiągnęły tę samą wartość,
- dla odmiany Sara najwyższą zawartością kwasu syringowego charakteryzowały się włókna pochodzące z pośredniego poziomu wilgoci w glebie (S35), a najniższą z kontroli (S45),
- dla odmiany Artemida, zawartość kwasu synapinowego najniższa była dla kontroli (A45), a najwyższa dla włókien pochodzących z pośredniego poziomu wilgoci w glebie (A35),
- dla odmiany Modran, najwyższą zawartością kwasu synapinowego wyróżniały się włókna pochodzące z kontroli (M45), natomiast zawartość tego kwasu we włóknach pochodzących z roślin hodowanych w warunkach największego stresu suszy (M25) oraz pośredniej wilgotności gleby (M35) była na podobnym poziomie,
- dla odmiany Sara, zawartość kwasu synapinowego maleje wraz ze wzrostem wilgotności gleby, przy czym dla włókien pochodzących z hodowli w warunkach największego stresu suszy (S25) oraz pośredniej wilgotności gleby (S35) jest również na podobnym poziomie,
- dla odmiany Artemida, zawartość kwasu *p*-kumarowego jest największa dla włókien pochodzących z największego stresu suszy (A25) i maleje wraz ze wzrostem wilgotności gleby, przy czym dla kontroli (A45) oraz pośredniego poziomu wilgotności w glebie (A35) jest na podobnym poziomie,
- dla odmiany Modran, zawartość kwasu *p*-kumarowego we włóknach maleje wraz ze wzrostem wilgotności gleby w której wzrastały rośliny Inu,
- dla odmiany Sara, zawartość kwasu *p*-kumarowego we włóknach pochodzących z największego stresu suszy (S25) oraz kontroli (S45) jest na podobnym poziomie, a dla włókien pochodzących z pośredniego poziomu wilgotności gleby (S35) nieznacznie wyższa,
- dla odmiany Artemida, zawartość kwasu ferulowego jest najwyższa dla włókien pochodzących z hodowli w warunkach pośredniego poziomu wilgotności gleby (A35), a najniższa dla kontroli (A45)

- dla odmiany Modran, zawartość kwasu ferulowego jest najwyższa dla włókien pochodzących z kontroli (M45), a najniższa dla włókien pochodzących z hodowli w warunkach pośredniego poziomu wilgotności gleby (M35),
dla odmiany Sara, zawartość kwasu ferulowego maleje wraz ze wzrostem wilgotności w glebie.

Tabela 23. Zawartość kwasów fenolowych we włóknach lnianych odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z 2021r.

2021r.								
Symbol	Zawartość kwasu syryngowego [mg/100g]	SD [mg/100g]	Zawartość kwasu synapinowego [mg/100g]	SD [mg/100g]	Zawartość kwasu p-kumarowego [mg/100g]	SD [mg/100g]	Zawartość kwasu ferulowego [mg/100g]	SD [mg/100g]
A25	0,000	0,000	0,744	0,011	0,274	0,008	0,323	0,005
A35	0,004	0,001	0,758	0,005	0,198	0,012	0,342	0,002
A45	0,003	0,001	0,721	0,005	0,213	0,004	0,314	0,001
M25	0,002	0,000	0,746	0,003	0,170	0,002	0,333	0,002
M35	0,003	0,000	0,747	0,002	0,157	0,004	0,318	0,000
M45	0,002	0,000	0,773	0,007	0,137	0,011	0,339	0,002
S25	0,004	0,000	0,775	0,007	0,174	0,015	0,342	0,002
S35	0,005	0,000	0,772	0,002	0,197	0,012	0,337	0,002
S45	0,003	0,000	0,756	0,005	0,167	0,003	0,332	0,001

Źródło: opracowanie własne

4.4.1.1. Analiza wariancji czynników na zawartość kwasu *p*-kumarowego we włóknach Inianych

W celu sprawdzenia wpływu odmiany Inu i stopnia wilgotności gleby podczas wzrostu roślin na zawartość kwasu *p*-kumarowego we włóknach w trzech kolejnych latach uprawy, zastosowano wieloczynnikowy model analizy wariancji w schemacie mieszanym. Zaobserwowano istotny statystycznie efekt główny odmiany Inu i polegał on na tym, że włókna odmiany Modran i Sara cechowały się istotnie mniejszą zawartością kwasu *p*-kumarowego w porównaniu do włókien odmiany Artemida. Wystąpił również istotny statystycznie efekt nasilenia wpływu wilgotności gleby podczas uprawy na zawartość kwasu we włóknie. Średnia zawartość kwasu *p*-kumarowego była istotnie statystycznie najwyższa we włóknach w przypadku wilgotności gleby na poziomie 25% PPW, natomiast najniższą jego zawartość odnotowano w warunku 35% PPW gleby (tabela 24).

Tabela 24. Wpływ odmiany Inu i stopnia wilgotności gleby na zawartość kwasu *p*-kumarowego we włóknach, mierzony w trzech kolejnych latach: część I (efekty główne)

		<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2	<i>Post-hoc</i>
A	2019	36	0,01	0,01	5895,23	0,001	0,937	A < B**
B	2020	36	0,03	0,02				A < C**
C	2021	36	0,19	0,04				B < C**
I	Artemida	36	0,09	0,10	113,01	0,001	0,545	II < I**
II	Modran	36	0,07	0,07				III < I**
III	Sara	36	0,07	0,08				
a	25%	36	0,08	0,10	25,33	0,001	0,091	b < a**
b	35%	36	0,07	0,08				b < c*
c	45%	36	0,07	0,08				c < a**

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

Źródło: opracowanie własne

Wszystkie kolejne efekty interakcji również okazały się istotne statystycznie (tabela 25). W przypadku odmian Artemida i Modran wilgotność gleby na poziomie 25% PPW skutkowała wyższą zawartością kwasu *p*-kumarowego we włóknach niż 35% i 45% PPW. W przypadku włókien odmiany Sara, poziom wilgotności gleby wynoszący 35% PPW wpływał na wyższą zawartość kwasu we włóknach niż 25% i 45% PPW. W obrębie wilgotności gleby 25%, 35% i 45% PPW na ogół odmiany

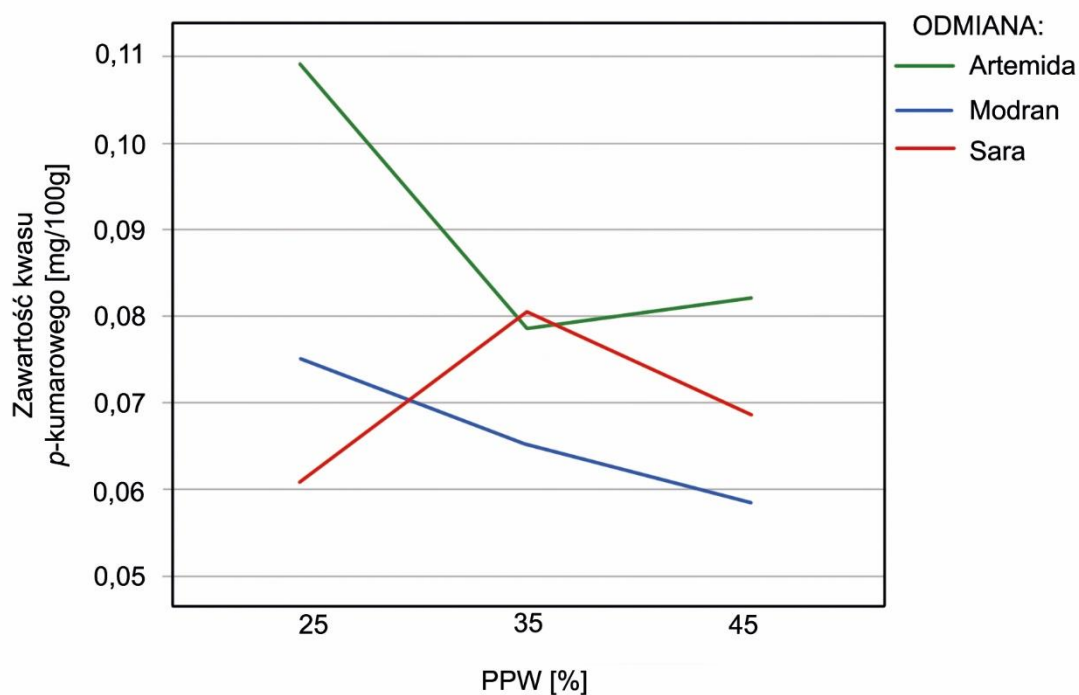
Artemida oraz Sara wpływały na wyższą zawartość kwasu we włóknach w porównaniu do odmiany Modran. Jedynie w przypadku 25% PPW to włókna odmiany Sara cechowały się najniższą zawartością kwasu *p*-kumarowego (rys. 41).

Tabela 25. Wpływ odmiany lnu i stopnia wilgotności gleby na zawartość kwasu *p*-kumarowego we włóknach, mierzony w trzech kolejnych latach: część II (efekty interakcyjne)

		<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2	<i>Post-hoc</i>
I.A	Artemida 2019	12	0,02	0,02	111,69	0,001	0,036	I.A < I.B**; I.A < I.C**;
I.B	Artemida 2020	12	0,03	0,02				I.B < I.C**; II.A <
I.C	Artemida 2021	12	0,23	0,04				II.B**; II.A < II.C**; II.B
II.A	Modran 2019	12	0,00	0,00				< II.C**; III.A < III.B**;
II.B	Modran 2020	12	0,04	0,01				III.A < III.C**; III.B <
II.C	Modran 2021	12	0,15	0,02				III.C**; I.B < II.B**; II.A
III.A	Sara 2019	12	0,01	0,00				< I.A**; II.A < III.A**;
III.B	Sara 2020	12	0,03	0,02				II.C < I.C**; II.C <
III.C	Sara 2021	12	0,18	0,02				III.C**; III.A < I.A**;
								III.B < II.B**; III.C <
								I.C**;
I.a	Artemida 25%	12	0,11	0,13	39,12	0,001	0,364	I.b < I.a**; I.c < I.a**;
I.b	Artemida 35%	12	0,08	0,09				II.b < II.a*; II.c < II.a**;
I.c	Artemida 45%	12	0,08	0,10				III.a < III.b**; III.a <
II.a	Modran 25%	12	0,08	0,08				III.c; III.c < III.b**; II.a
II.b	Modran 35%	12	0,07	0,07				< I.a**; II.b < I.b**; II.b
II.c	Modran 45%	12	0,06	0,06				< III.b**; II.c < I.c**;
III.a	Sara 25%	12	0,06	0,09				II.c < III.c*; III.a <
III.b	Sara 35%	12	0,08	0,09				I.a**; III.a < II.a**; III.c
III.c	Sara 45%	12	0,07	0,08				< I.c**;
a.A	25% 2019	12	0,01	0,01	26,12	0,001	0,008	a.A < a.B**; a.A <
a.B	25% 2020	12	0,03	0,02				a.C**; a.B < a.C**; b.A
a.C	25% 2021	12	0,21	0,05				< b.B**; b.A < b.C**;
b.A	35% 2019	12	0,00	0,00				b.B < b.C**; c.A <
b.B	35% 2020	12	0,04	0,00				c.B**; c.A < c.C**; c.B
b.C	35% 2021	12	0,18	0,02				< c.C**;
c.A	45% 2019	12	0,01	0,02				a.B < b.B**; a.B <
c.B	45% 2020	12	0,03	0,02				c.B**; b.A < a.A**; b.A
c.C	45% 2021	12	0,17	0,03				< c.A**; b.C < a.C**;
								c.B < b.B**; c.C <
								a.C**;

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

Źródło: opracowanie własne



Rys. 41. Wpływ odmiany lnu i stopnia wilgotności gleby na zawartość kwasu *p*-kumarowego we włóknie – efekt interakcji
Źródło: opracowanie własne

4.4.1.2. Analiza wariancji czynników na zawartość kwasu synapinowego i syringowego we włóknach lnianych

W celu sprawdzenia wpływu odmiany lnu i stopnia wilgotności gleby podczas wzrostu roślin na zawartość kwasu syringowego oraz kwasu synapinowego we włóknach w trzech kolejnych latach wyznaczono wieloczynnikowy model analizy wariancji w schemacie mieszanym (tabela 26). Ze względu na zbyt niską liczebność wyników nie obliczono w tym przypadku efektów interakcji.

Tabela 26. Wpływ odmiany lnu i stopnia wilgotności gleby na zawartość kwasu syringowego i synapinowego we włóknie

kwas syringowy		N	M	SD	F	p	η^2	Post-hoc
I	Artemida	12	0,20	0,17	62,00	0,001	0,416	I < III**
II	Modran	12	0,23	0,05				II < III**
III	Sara	12	0,40	0,09				
a	25%	12	0,20	0,18	48,50	0,001	0,325	a < b**
b	35%	12	0,38	0,10				a < c
c	45%	12	0,25	0,05				c < b**
kwas synapinowy								
I	Artemida	12	0,74	0,02	32,17	0,001	0,400	I < II**
II	Modran	12	0,76	0,01				I < III**
III	Sara	12	0,77	0,01				II < III*
a	25%	12	0,75	0,02	3,51	0,075	0,001	c < b
b	35%	12	0,76	0,01				
c	45%	12	0,75	0,02				

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

Źródło: opracowanie własne

Przeprowadzone analizy wykazały istotny statystycznie izolowany wpływ odmiany lnu na zawartość kwasu syringowego we włóknach, który polegał na tym, że włókna odmiany Sara charakteryzowały się istotnie najwyższą zawartością kwasu syringowego w porównaniu do włókien odmian Modran i Artemida. Odnotowano również istotny efekt główny stopnia wilgotności gleby podczas uprawy lnu, gdzie na poziomie 25% PPW gleby włókna wyróżniały się istotnie najniższą zawartością kwasu syringowego w porównaniu do pozostałych warunków wilgotności. Wilgotność gleby na poziomie 35% PPW wpływała na wyższą zawartość kwasu syringowego we włóknach niż 45% PPW gleby.

W przypadku kwasu synapinowego zaobserwowano, że włókna odmiany Sara uzyskały istotnie najwyższe zawartości kwasu synapinowego w porównaniu do pozostałych odmian. Ponadto, włókna lniane odmiany Modran cechowały się istotnie wyższą zawartością kwasu synapinowego niż odmiany Artemida. Odnotowano również, że wilgotność gleby na poziomie 35% PPW wpływała na wyższą średnią zawartość omawianego kwasu niż 45% PPW.

4.4.1.3. Analiza wariancji czynników na zawartość kwasu ferulowego we włóknach Inianych

W celu sprawdzenia wpływu odmiany Inu i stopnia wilgotności gleby podczas wzrostu roślin na zawartość kwasu ferulowego we włóknach obliczono wieloczynnikowy model analizy wariancji w schemacie mieszanym (tabela 27). Odnotowano istotny statystycznie efekt wpływu odmiany Inu na zawartość badanego kwasu we włóknie. Testy post-hoc wykazały, że pomijając inne czynniki, włókna odmiany Artemida cechowały się najwyższą zawartością kwasu ferulowego. Zaobserwowano również istotny statystycznie efekt główny stopnia wilgotności gleby podczas uprawy Inu. Polegał on na tym, że w przypadku wilgotności gleby na poziomie 45% PPW zawartość kwasu ferulowego we włóknach była istotnie wyższa w porównaniu do 25% i 35% PPW gleby.

Tabela 27. Wpływ odmiany Inu i stopnia wilgotności gleby na zawartość kwasu ferulowego we włóknie, mierzony w dwóch kolejnych latach: część I (efekty główne)

		<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2	<i>Post-hoc</i>
A	2019	36	0,74	0,18	1907,39	0,001	0,844	B < A**
B	2021	36	0,33	0,01				
I	Artemida	24	0,62	0,34	71,81	0,001	0,502	II < I**
II	Modran	24	0,49	0,17				III < I**
III	Sara	24	0,50	0,17				
a	25%	24	0,50	0,18	23,49	0,001	0,166	a < c**
b	35%	24	0,52	0,21				b < c**
c	45%	24	0,58	0,32				

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

Źródło: opracowanie własne

Wszystkie efekty interakcji okazały się istotne statystycznie (tabela 28). Efekt interakcji pomiędzy odmianą Inu a poziomem wilgotności gleby podczas uprawy polegał na tym, że w przypadku włókien odmiany Artemida wraz ze wzrostem wilgotności gleby wzrastała zawartość kwasu ferulowego we włóknach, a w przypadku włókien odmiany Modran dla wilgotności 45% PPW gleby wpływało na wyższą zawartość omawianego kwasu we włóknach niż w przypadku 35% PPW gleby. Oprócz tego w przypadku, włókna odmiany Artemida pochodzące z Inu, który

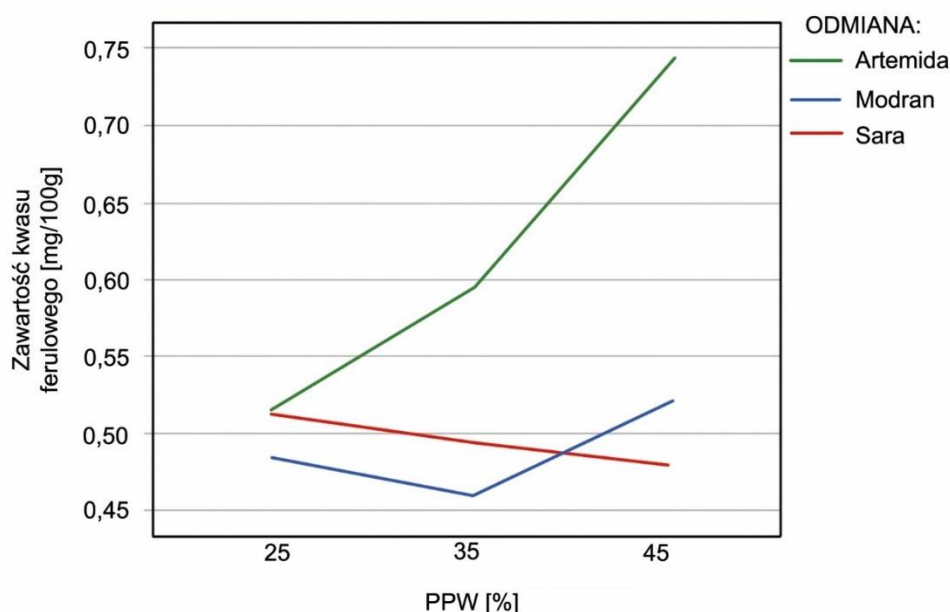
był uprawiany na glebie o wilgotności na poziomie 35% i 45% PPW, a wykazywały większą zawartość kwasu ferulowego niż odmiany Modran i Sara (rys. 42).

Tabela 28. Wpływ odmiany lnu i stopnia wilgotności gleby na zawartość kwasu ferulowego we włóknie, mierzony w dwóch kolejnych latach: część II (efekty interakcji)

		<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2	<i>Post-hoc</i>
I.A	Artemida 2019	12	0,91	0,22	89,90	0,001	0,080	I.B < I.A**; II.B < II.A**; III.B < III.A**;
I.B	Artemida 2021	12	0,33	0,01				
II.A	Modran 2019	12	0,65	0,05				
II.B	Modran 2021	12	0,33	0,01				
III.A	Sara 2019	12	0,65	0,03				
III.B	Sara 2021	12	0,34	0,00				
I.a	Artemida 25%	8	0,52	0,22	21,50	0,001	0,300	I.a < I.b*; I.a < I.c**; I.b < I.c**; II.b < II.c*; II.b < I.b**; II.c < I.c**; III.b < I.b**; III.c < I.c**;
I.b	Artemida 35%	8	0,59	0,29				
I.c	Artemida 45%	8	0,74	0,50				
II.a	Modran 25%	8	0,48	0,18				
II.b	Modran 35%	8	0,46	0,16				
II.c	Modran 45%	8	0,52	0,21				
III.a	Sara 25%	8	0,51	0,20				
III.b	Sara 35%	8	0,49	0,18				
III.c	Sara 45%	8	0,48	0,17				
a.A	25% 2019	12	0,68	0,03	30,04	0,001	0,027	a.B < a.A**; b.B < b.A**; c.B < c.A**; a.A < c.A**; a.B < c.B*; b.A < c.A**; b.B < c.B*;
a.B	25% 2021	12	0,33	0,01				
b.A	35% 2019	12	0,70	0,12				
b.B	35% 2021	12	0,33	0,01				
c.A	45% 2019	12	0,84	0,27				
c.B	45% 2021	12	0,33	0,01				

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

Źródło: opracowanie własne



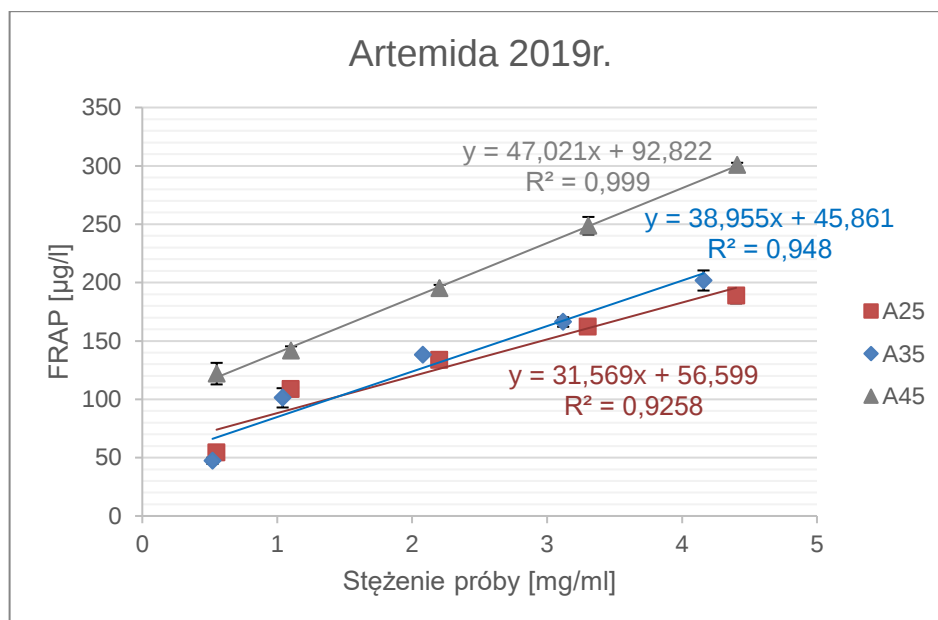
Rys. 42. Wpływ odmiany lnu i poziomu wilgotności gleby na zawartość kwasu ferulowego we włóknie – efekt interakcji
Źródło: opracowanie własne

4.4.2. Aktywność antyoksydacyjna włókien lnianych

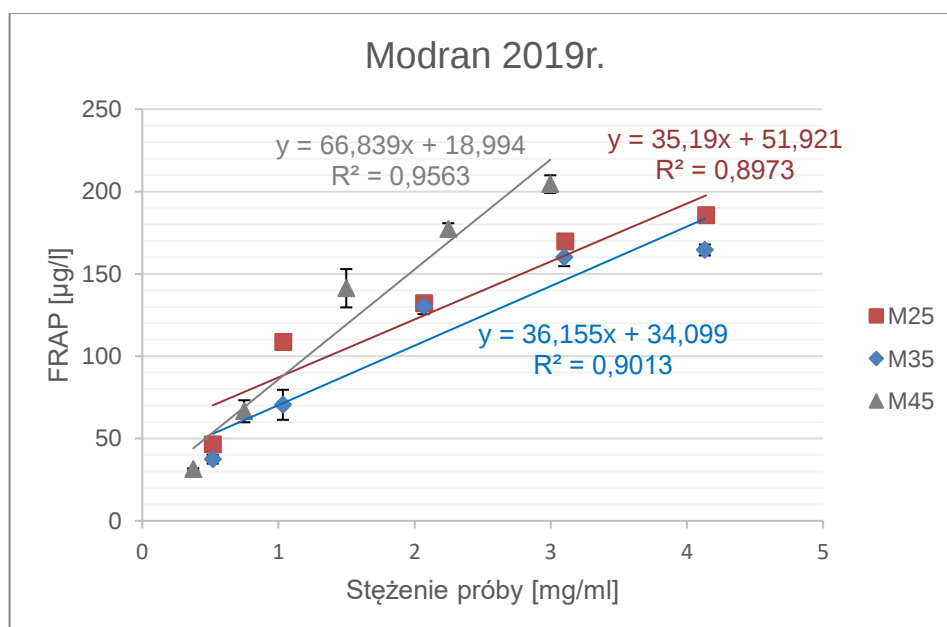
4.4.2.1. Potencjał redukcyjny włókien lnu oznaczony metodą FRAP

Metoda FRAP, która pozwala oznaczyć zdolność włókna do redukowania jonów żelaza, umożliwia bezpośrednie określenie zdolności redukujących danego związku. Właściwości antyoksydacyjne prób włókna określono poprzez porównanie zmian absorbancji roztworu z wartością absorbancji roztworu wzorcowego. Absorbancja, dla każdego przypadku, w szerokim zakresie zmienia się liniowo. Przyjmuje się, że jednostka FRAP odpowiada zdolności redukcji 1 mola Fe^{3+} do Fe^{2+} (Wilczyńska 2009). Do zalet metody FRAP należy, niska cena, szybkość wykonania badań oraz wysoka powtarzalność wyników. Potencjał redukcyjny ekstraktów z włókien lnu przyjmował wartości FRAP 12,72–300,83 $\mu\text{g/l}$ w zależności od zastosowanego stężenia próby. Wyniki przedstawiono na wykresach zależności wpływu stężenia próby na poziom aktywności antyoksydacyjnej, wyznaczono krzywą kalibracyjną wraz z równaniem (rys. 43–51). Do każdego równania linii trendu obliczono wartość R^2 w celu określenia miary jakości dopasowania modelu. Dany współczynnik może przyjmować wartości

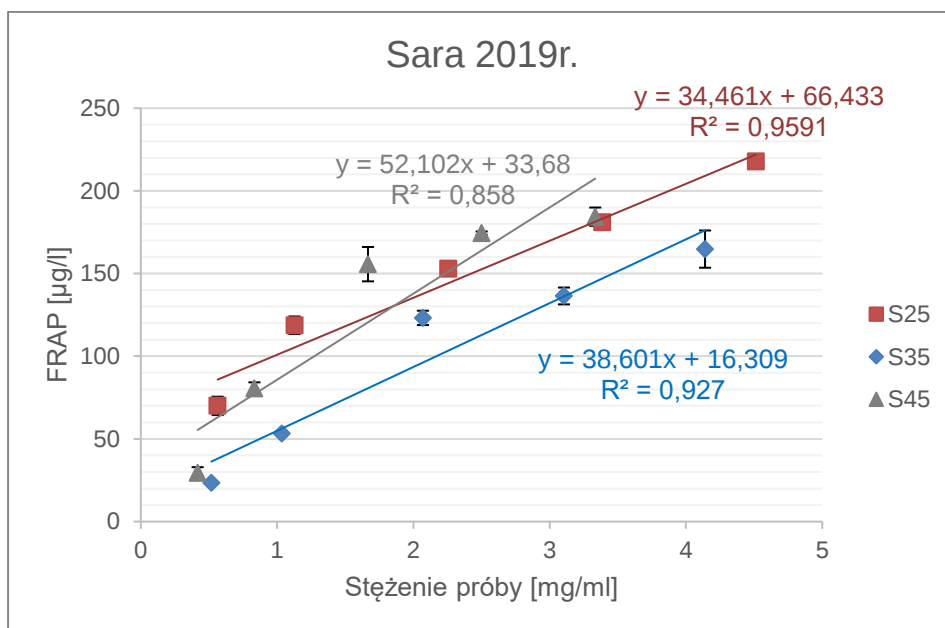
od 0 do 1, gdzie im parametr jest większy, tym prosta regresji jest lepiej dopasowana do danych. W każdym badanym przypadku, korelacja została oceniona jako bardzo silna.



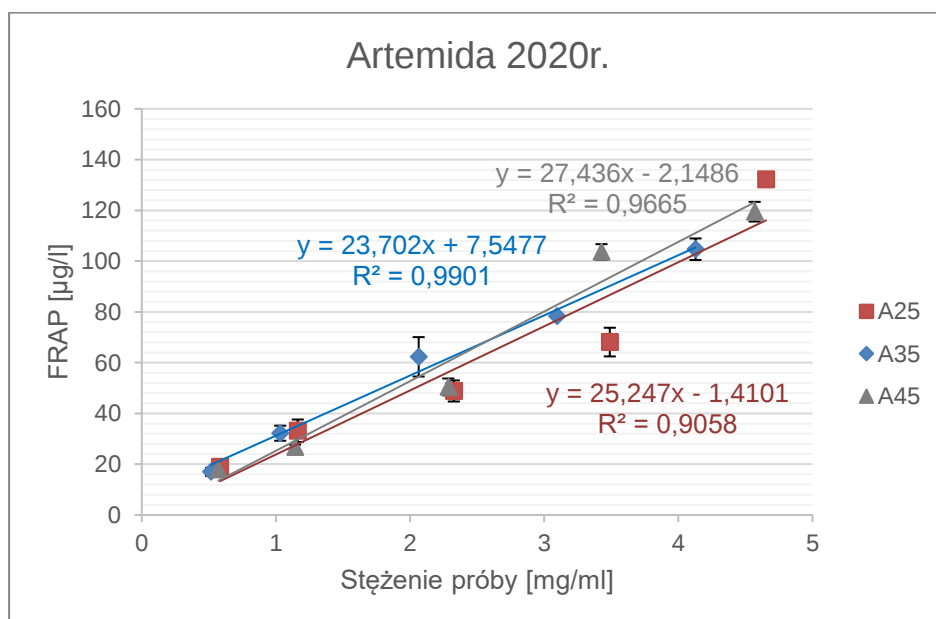
Rys. 43. Wpływ stężenia próby na zdolność włókna do redukcji jonów żelaza dla odmiany Artemida hodowanej w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019r.
Źródło: opracowanie własne



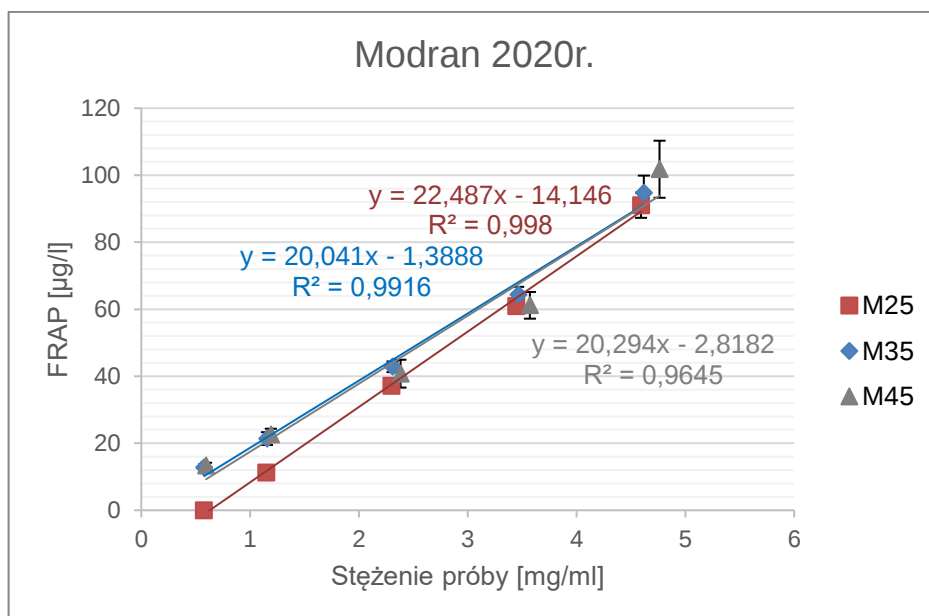
Rys. 44. Wpływ stężenia próby na zdolność włókna do redukcji jonów żelaza dla odmiany Modran hodowanej w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019r.
Źródło: opracowanie własne



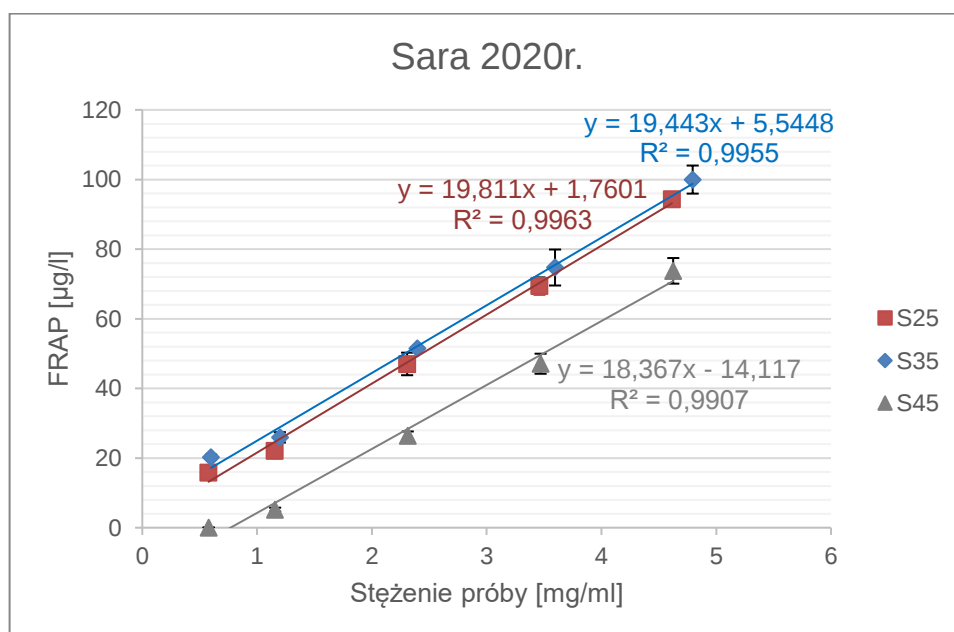
Rys. 45. Wpływ stężenia próbki na zdolność włókna do redukcji jonów żelaza dla odmiany Sara hodowanej w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019r.
Źródło: opracowanie własne



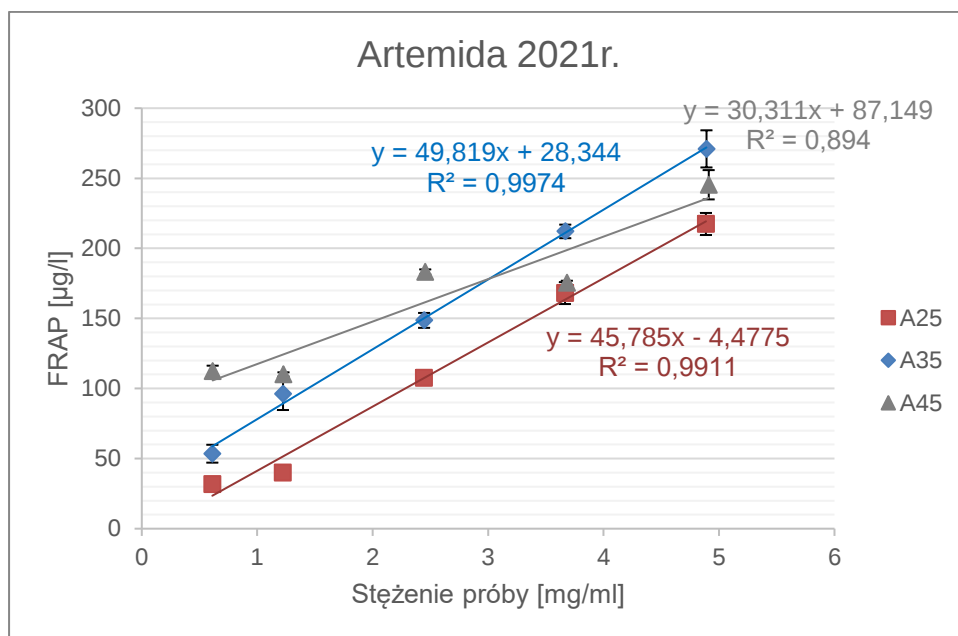
Rys. 46. Wpływ stężenia próbki na zdolność włókna do redukcji jonów żelaza dla odmiany Artemida hodowanej w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2020r.
Źródło: opracowanie własne



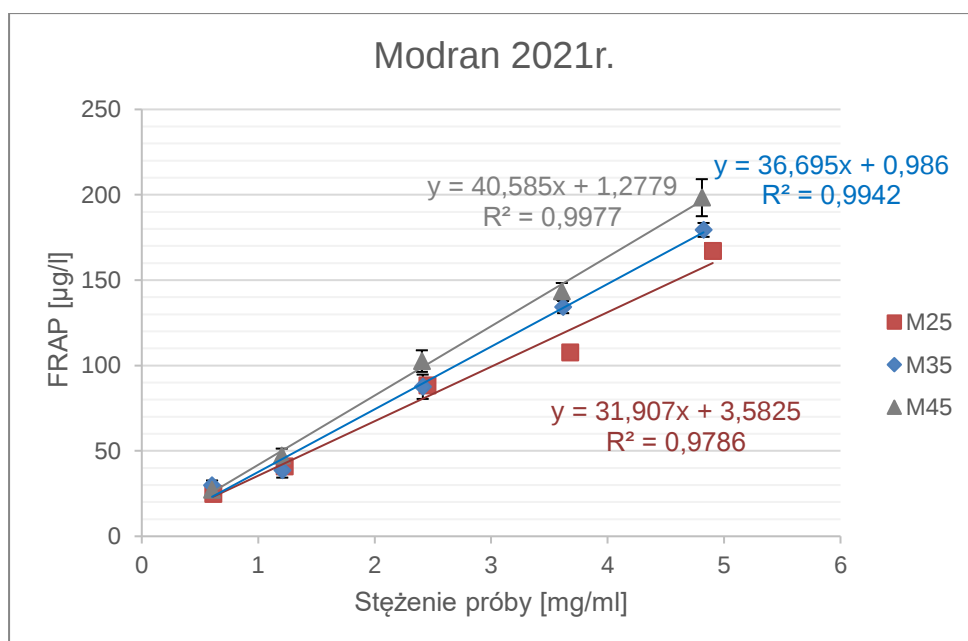
Rys. 47. Wpływ stężenia próbki na zdolność włókna do redukcji jonów żelaza dla odmiany Modran hodowanej w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2020r.
Źródło: opracowanie własne



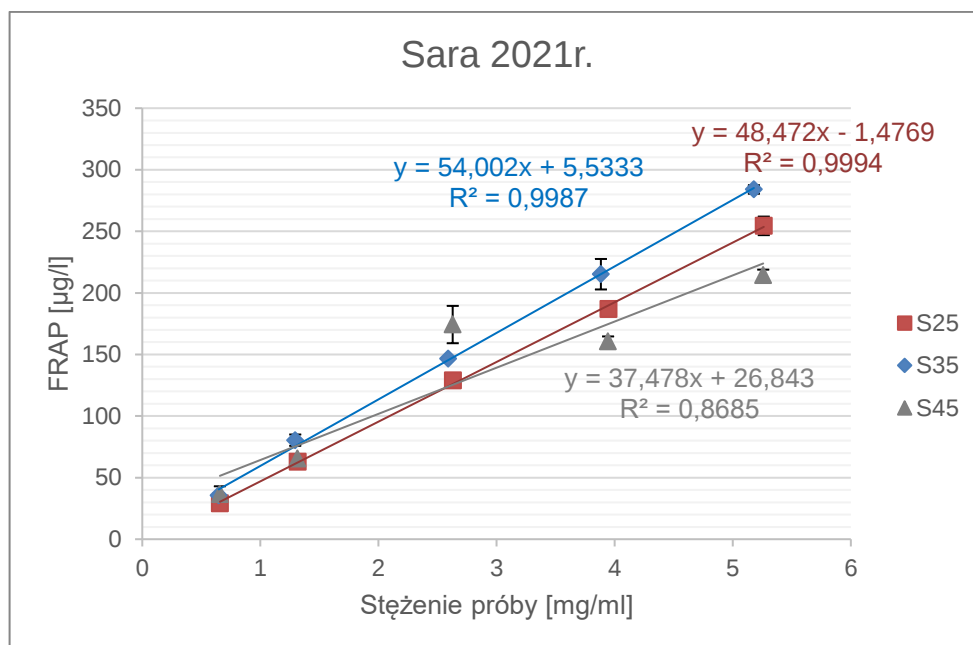
Rys. 48. Wpływ stężenia próbki na zdolność włókna do redukcji jonów żelaza dla odmiany Sara hodowanej w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2020r.
Źródło: opracowanie własne



Rys. 49. Wpływ stężenia próby na zdolność włókna do redukcji jonów żelaza dla odmiany Artemida hodowanej w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2021r.
Źródło: opracowanie własne



Rys. 50. Wpływ stężenia próby na zdolność włókna do redukcji jonów żelaza dla odmiany Modran hodowanej w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2021r.
Źródło: opracowanie własne



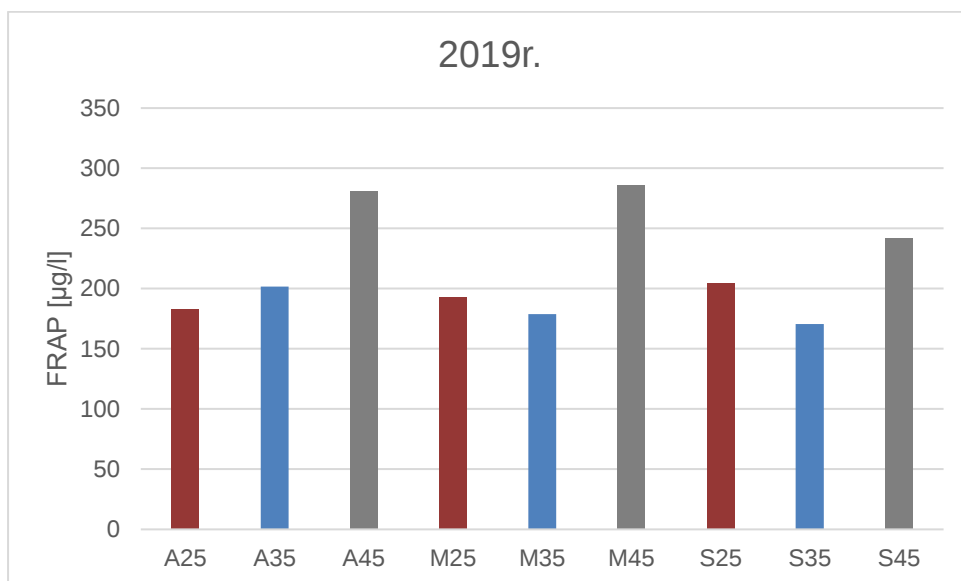
Rys. 51. Wpływ stężenia próby na zdolność włókna do redukcji jonów żelaza dla odmiany Sara hodowanej w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2021r.

Źródło: opracowanie własne

Ocenę zdolności włókna do redukcji jonów żelaza podjęto na podstawie jednego, wybranego stężenia roztworu = 4 mg/ml, a wyniki porównano na wykresach (rys. 52–54). Ze względu na brak powtarzalności wyników w danych latach, próby z każdego roku zostały ocenione indywidualnie:

Wnioski oceny zdolności włókna do redukcji jonów żelaza 2019r. (rys. 52):

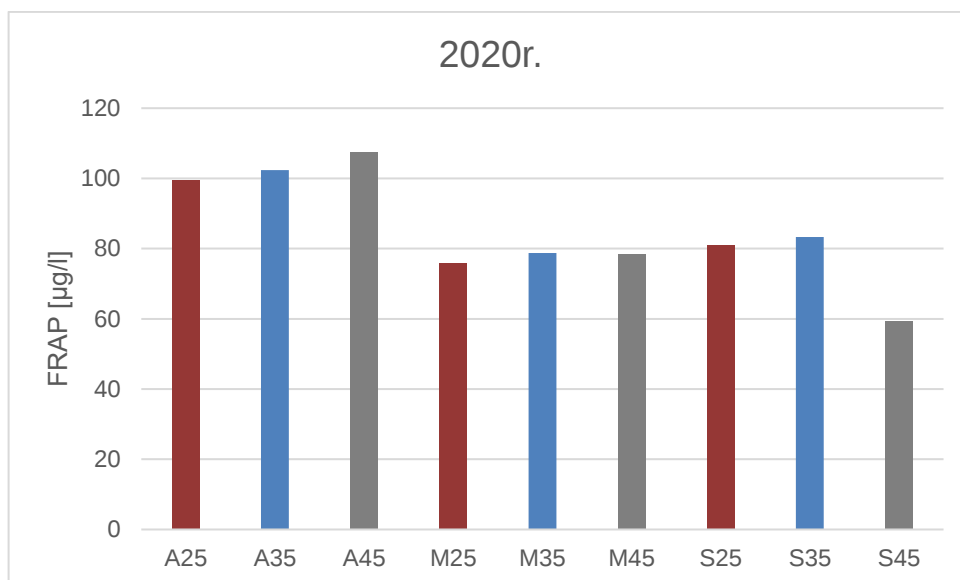
- włókna pozyskane w 2019r. charakteryzowały się najsilniejszą zdolnością do redukcji jonów żelaza w porównaniu do włókien z kolejnych lat,
- najsilniejszą zdolność do redukcji jonów żelaza wykazują włókna wszystkich badanych odmian roślin, które wzrastały w warunkach kontroli (A45, M45, S45),
- dla włókien odmiany Artemida zdolność redukcji jonów żelaza spada wraz ze spadkiem poziomu wilgotności gleby, w której rośliny wzrastały (A35, A25),
- dla włókien odmiany Modran oraz Sara włókna pochodzące z roślin, gdzie wilgotność gleby była utrzymywana na pośrednim poziomie (35% PPW), zdolność redukcji jonów żelaza jest najniższa (M35, S35).



Rys. 52. Zdolność włókien lnianych pochodzących z 2019r. do redukcji jonów żelaza dla stężenia próby wynoszącej 4 mg/ml
Źródło: opracowanie własne

Wnioski oceny zdolności włókna lnu do redukcji jonów żelaza ekstraktów z włókien z 2020r. (rys. 53):

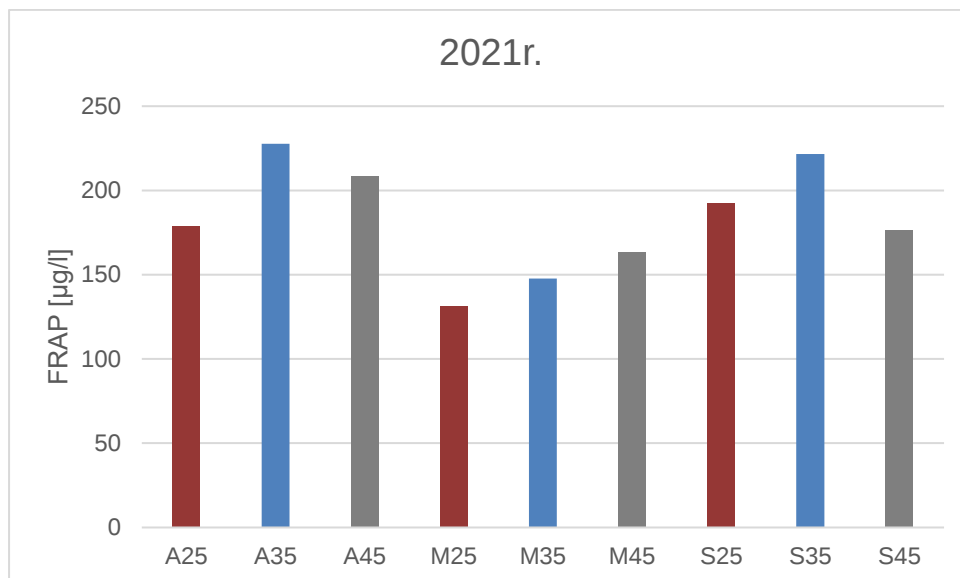
- włókna pozyskane w 2020r. charakteryzowały się najniższą zdolnością redukcji jonów żelaza w porównaniu do włókien z 2019r. oraz 2021r.,
- stres suszy nie wpłynął znacząco na poziom redukcji jonów żelaza dla odmiany Artemida, wartości FRAP są na poziomie 99–107 µg/l, przy czym wyniki pokazują, że redukcja jonów żelaza wzrasta wraz ze wzrostem wilgotności gleby, w której hodowane były rośliny lnu (A25, A35, A45),
- podobna zależność jak dla odmiany Artemida występuje w przypadku włókna odmiany Modran, gdzie wyniki FRAP są na zbliżonym poziomie (76–79 µg/l),
- dla odmiany Sara najniższą zdolnością redukcji jonów żelaza charakteryzowały się włókna pochodzące z kontroli (S45).



Rys. 53. Zdolność włókien lnianych pochodzących z 2020r. do redukcji jonów żelaza dla stężenia próby wynoszącej 4 mg/ml
Źródło: opracowanie własne

Wnioski oceny zdolności włókna lnu do redukcji jonów żelaza ekstraktów z włókien z 2021r. (rys. 54):

- najsilniejszą zdolność redukcji jonów żelaza posiadały włókna pochodzące z odmian Artemida i Sara, gdzie wilgotność gleby podczas ich wzrostu była utrzymywana na pośrednim poziomie 35% PPW (A35, S35),
- dla odmiany Artemida najniższą wartość zdolności redukcji jonów żelaza posiadają włókna pochodzące z upraw w stresie suszy (A25), a włókna pochodzące z kontroli (A45) przyjmują pośrednią zdolność,
- dla odmiany Modran, zdolność włókien do redukcji jonów żelaza wzrasta wraz ze wzrostem wilgotności gleby w której rośliny wzrastały (M25→M35→M45),
- dla odmiany Sara najniższą zdolność do redukcji jonów żelaza osiągają włókna z kontroli (S45), a pośrednią wartość osiągają włókna pochodzące z uprawy w warunkach największego stresu suszy (S25).



Rys. 54. Zdolność włókien lnianych pochodzących z 2021r. do redukcji jonów żelaza dla stężenia próby wynoszącej 4 mg/ml
Źródło: opracowanie własne

Analizując wyniki badań zdolności włókien lnu do redukcji jonów żelaza, biorąc pod uwagę wszystkie 9 przypadków, na które składają się trzy odmiany lnu hodowane w takich samych warunkach wilgotności gleby, badane w trzech kolejnych latach stwierdza się, że:

- w pięciu przypadkach najwyższym wskaźnikiem FRAP charakteryzowały się włókna lnu hodowane w warunkach kontroli, czyli najwyższej wilgotności gleby, przy czym FRAP wzrastał wraz ze wzrostem wartości PPW,
- w czterech przypadkach najwyższym wskaźnikiem FRAP charakteryzowały się włókna lnu hodowane w warunkach zmniejszonej wilgotności gleby 35% PPW,
- w pięciu przypadkach najniższym wskaźnikiem FRAP charakteryzowały się włókna lnu hodowane w warunkach stresu suszy 25% PPW,
- w żadnym przypadku nie odnotowano najwyższej wartości FRAP dla włókna dostarczonego przez rośliny wzrastające w stresie suszy 25% PPW.

Aktywność antyoksydacyjna włókien lnu jest parametrem wieloczynnikowym, zależy m. in. od odmiany oraz od sposobu i warunków roszenia słomy lnianej. Len wszystkich trzech odmian roszony był na łące, gdzie aktywują się mikroorganizmy, głównie grzyby ale również bakterie powodujące rozkład substancji pektynowych, częściowo również lignin i hemicelulozy. Agresywne mikroorganizmy oraz powstałe w wyniku ich działania enzymy mogą mieć wpływ na zawartość kwasów fenolowych, a tym samym na zdolność włókna do redukcji jonów żelaza, czyli aktywność antyoksydacyjną włókna. Roszenie na łące jest metodą powszechnie stosowaną dla lnu, mimo że jest silnie zależną od warunków pogodowych, która nie podlega kontroli. Podczas prowadzonego w ramach doświadczenia procesu roszenia słomy lnianej niemożliwym było zapewnienie tej samej temperatury i wilgotności powietrza oraz identycznej liczby opadów w latach 2019, 2020, 2021. Stąd wynikają różnice w wynikach badań aktywności antyoksydacyjnej włókna lnu w kolejnych latach prowadzenia prac.

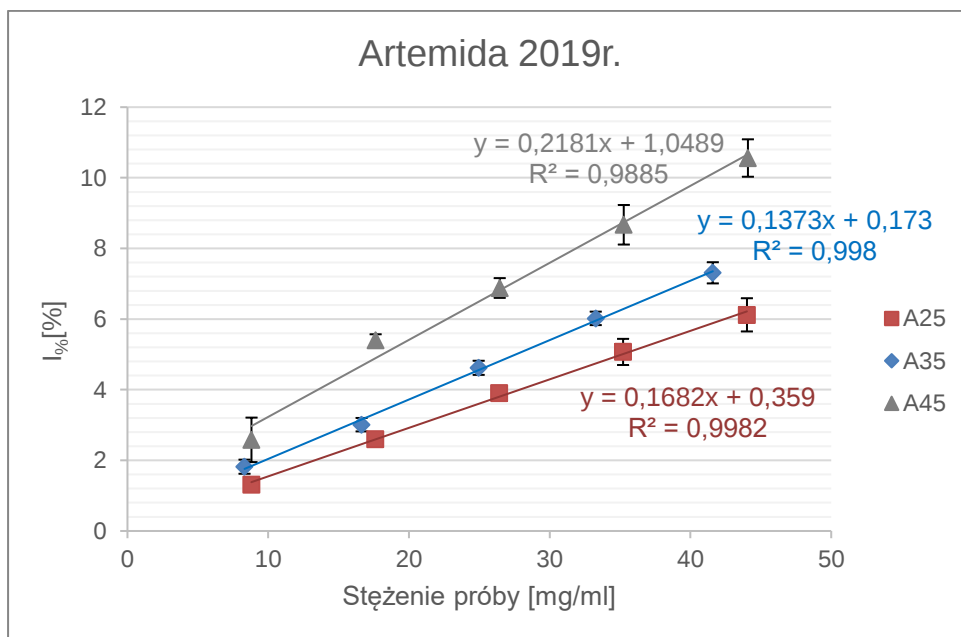
Podsumowując, jest bardzo prawdopodobne, że warunki uprawy roślin lnu w zakresie wilgotności gleby na poziomie 45% PPW sprzyjają wykształceniu się aktywności antyoksydacyjnej we włóknie. Jednocześnie należy stwierdzić, iż stres suszy na poziomie 25% PPW ogranicza kształtowanie się włókna o wysokiej aktywności antyoksydacyjnej wszystkich badanych odmianach lnu. Roślina wzrastająca w trudnych warunkach stresu suszy, wykorzystuje rezerwę antyoksydacyjną walcząc o przetrwanie, czego skutkiem są słabsze właściwości przeciwutleniające włókna.

4.4.2.2. Analiza potencjału antyoksydacyjnego włókien lnianych z wykorzystaniem rodnika DPPH

Zaletami metody DPPH jest stosunkowo łatwa metodyka oraz komercyjna dostępność modelowego rodnika. Do wad należy brak standardowych procedur analitycznych, które pozwoliłyby na uniknięcie nieścisłości podczas porównania rezultatów z danymi literaturowymi.

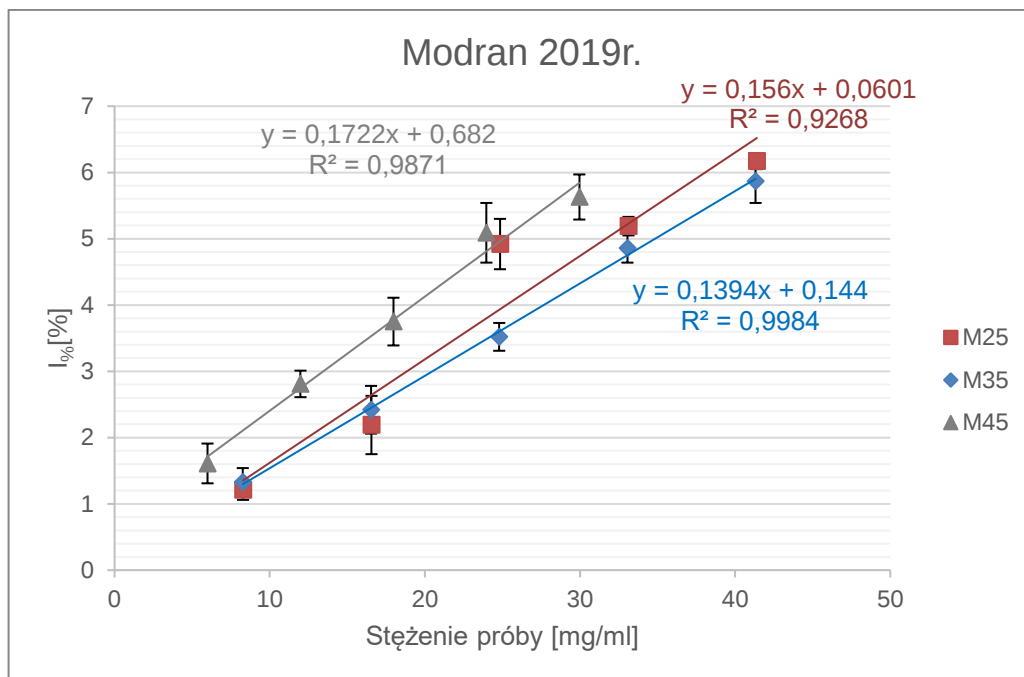
Zdolność antyoksydacyjna ekstraktów z włókien lnu została wyrażona jako procent inhibicji (I%) rodnika DPPH oraz osiągała wartości, przy podanych stężeniach 0,24–15,99%. Na podstawie równania regresji liniowej obliczono

parametr IC_{50} , który określa potrzebne stężenie substancji zawierającej przeciwutleniacz w celu usunięcia 50% początkowych rodników DPPH. Im wyższa wartość IC_{50} , tym efektywność danego antyutleniacza jest mniejsza. Na rysunkach 55–63 do każdego równania linii trendu obliczono wartość R^2 oraz oceniono dopasowanie jako bardzo silnie.



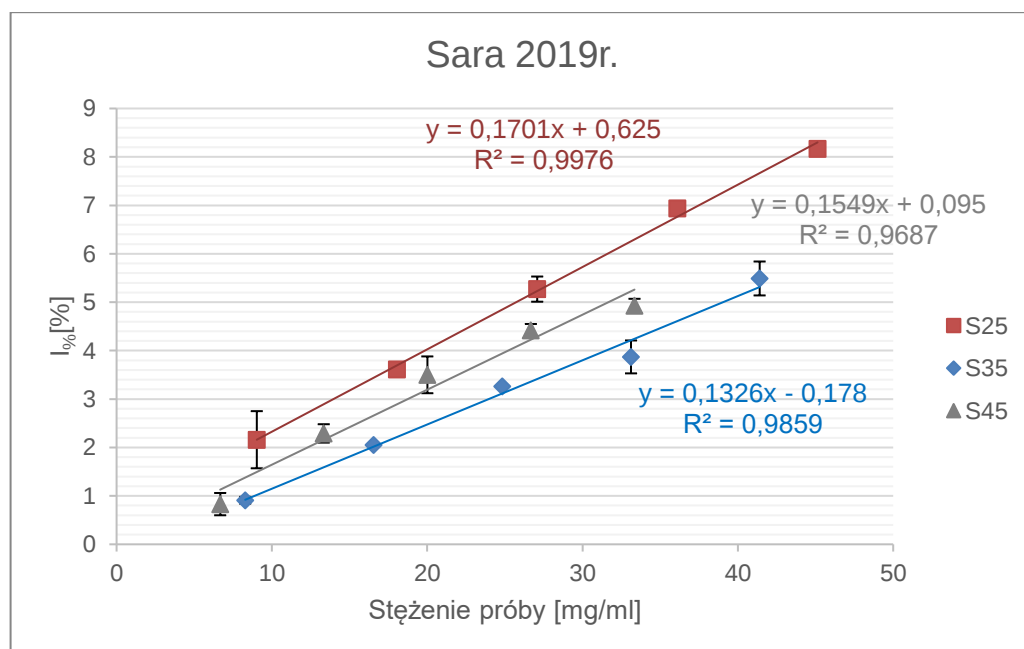
Rys. 55. Wpływ stężenia próbki na zdolność wychwytywania modelowego rodnika DPPH – ekstrakt z włókien lnianych odmiany Artemida pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019r.

Źródło: opracowanie własne



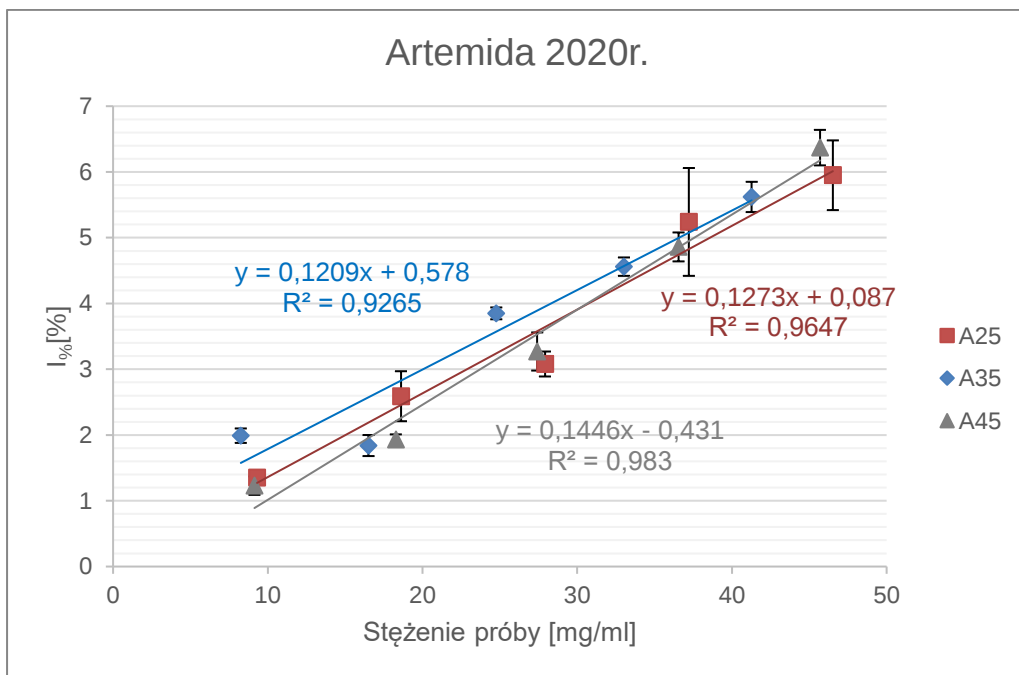
Rys. 56. Wpływ stężenia próby na zdolność wychwytywania modelowego rodnika DPPH - ekstrakt z włókien lnianych odmiany Modran pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019r.

Źródło: opracowanie własne



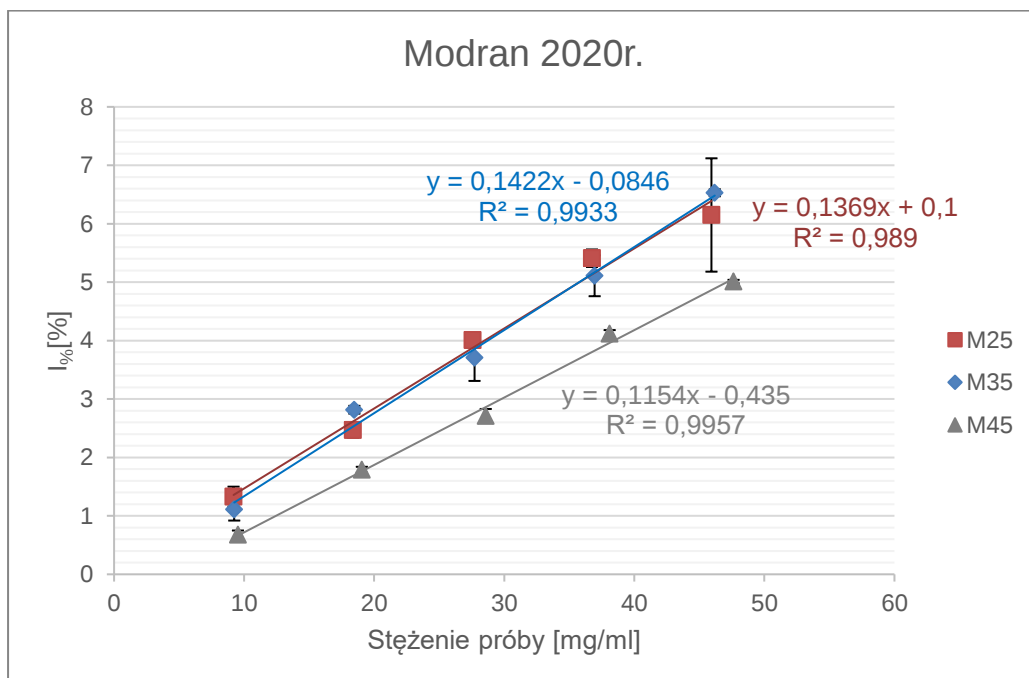
Rys. 57. Wpływ stężenia próby na zdolność wychwytywania modelowego rodnika DPPH - ekstrakt z włókien lnianych odmiany Sara pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019r.

Źródło: opracowanie własne



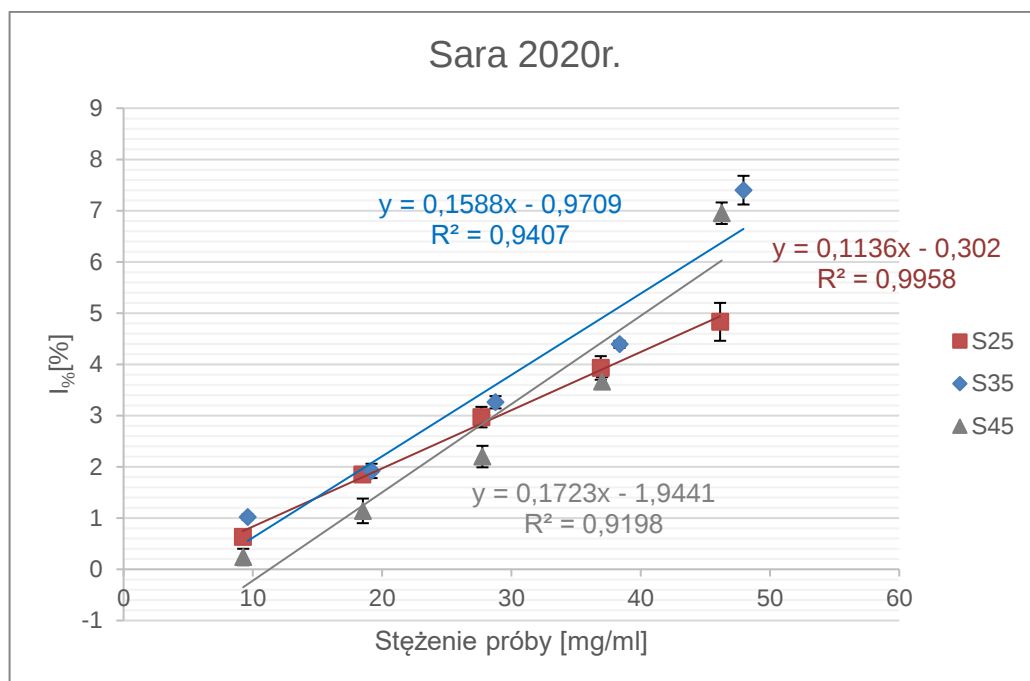
Rys. 58. Wpływ stężenia próby na zdolność wychwytywania modelowego rodnika DPPH - ekstrakt z włókien lnianych odmiany Artemida pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2020r.

Źródło: opracowanie własne

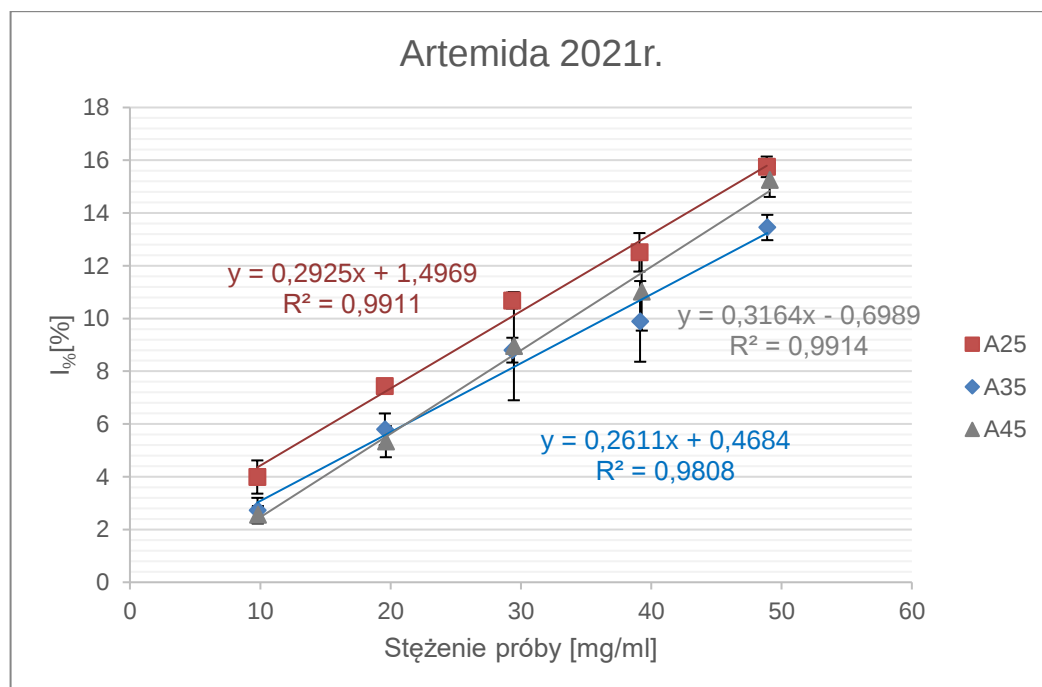


Rys. 59. Wpływ stężenia próby na zdolność wychwytywania modelowego rodnika DPPH - ekstrakt z włókien lnianych odmiany Modran pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2020r.

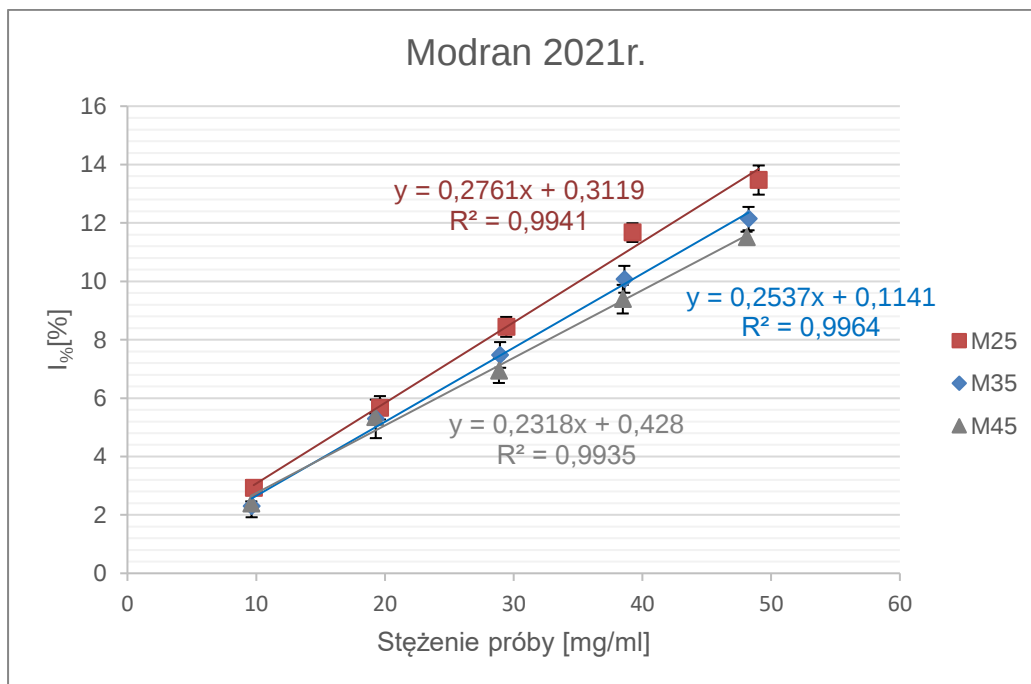
Źródło: opracowanie własne



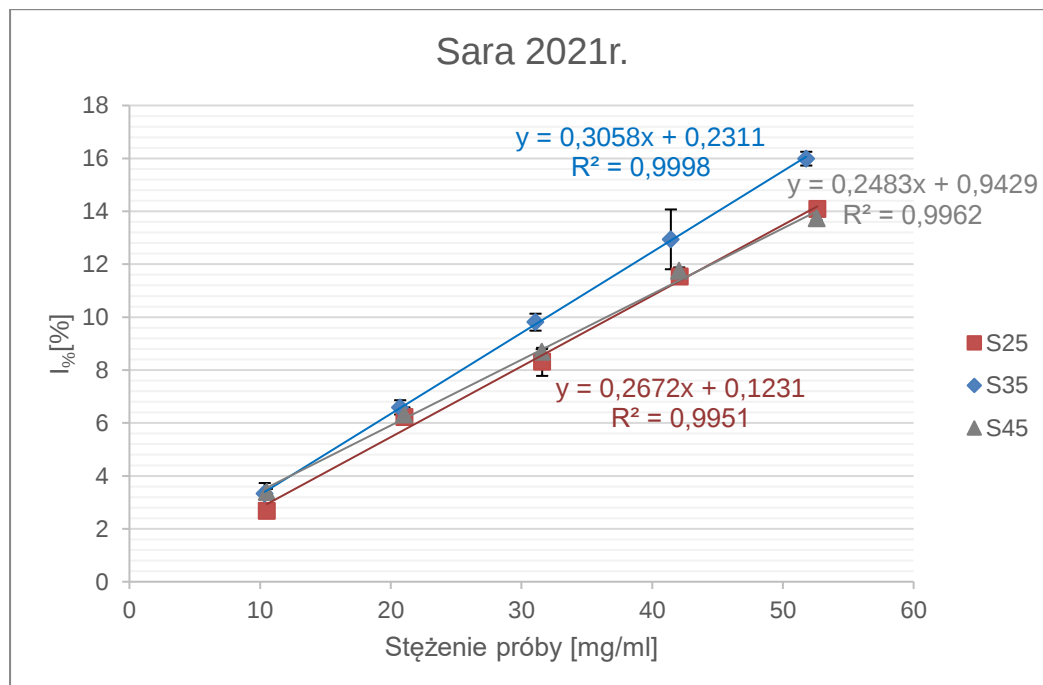
Rys. 60. Wpływ stężenia próby na zdolność wychwytywania modelowego rodnika DPPH - ekstrakt z włókien lnianych odmiany Sara pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2020r.
Źródło: opracowanie własne



Rys. 61. Wpływ stężenia próby na zdolność wychwytywania modelowego rodnika DPPH - ekstrakt z włókien lnianych odmiany Artemida pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2021r.
Źródło: opracowanie własne



Rys. 62. Wpływ stężenia próby na zdolność wychwytywania modelowego rodnika DPPH - ekstrakt z włókien lnianych odmiany Modran pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2021r.
Źródło: opracowanie własne

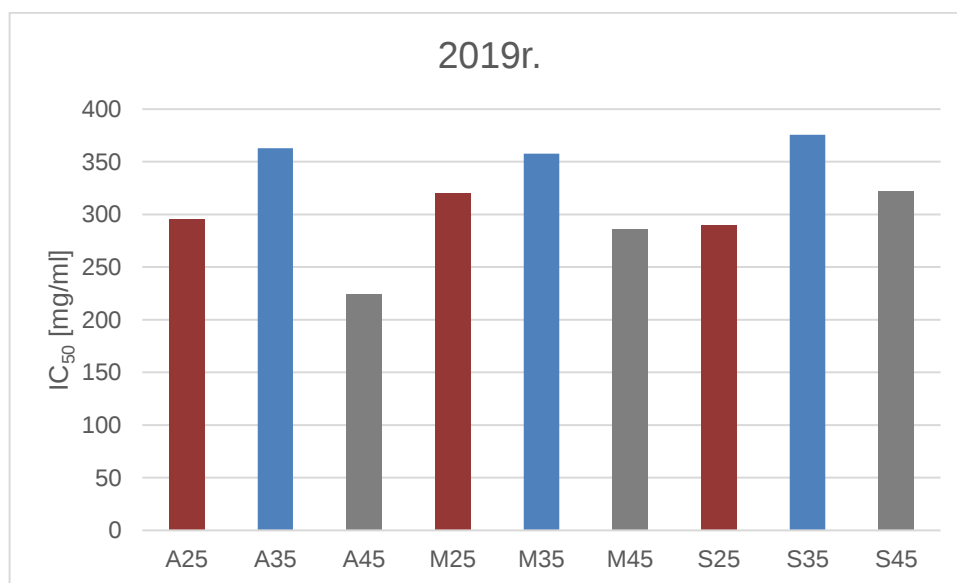


Rys. 63. Wpływ stężenia próby na zdolność wychwytywania modelowego rodnika DPPH - ekstrakt z włókien lnianych odmiany Sara pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2021r.
Źródło: opracowanie własne

Ze względu na brak powtarzalności wyników w danych latach, próby z każdego roku zostały ocenione indywidualnie:

Wnioski dla wyników aktywności antyoksydacyjnej włókien z 2019r. (rys. 64):

- najsilniejszą aktywnością antyoksydacyjną charakteryzowała się odmiana Artemida rosnąca w kontroli (A45),
- odmiany Artemida oraz Modran charakteryzowały się podobnymi zależnościami, gdzie włókna pochodzące z kontroli (A45, M45) osiągały lepsze wyniki aktywności antyoksydacyjnej w porównaniu z włóknami, które rosły w stresie suszy,
- najlepsze właściwości antyoksydacyjne osiągnęły włókna odmiany Sara, które rosły w stresie suszy (S25),
- najslabszą aktywnością antyoksydacyjną charakteryzowały się włókna pochodzące z gleby nawadnianej na średnim poziomie (35% PPW) dla wszystkich badanych odmian (A35, M35, S35).

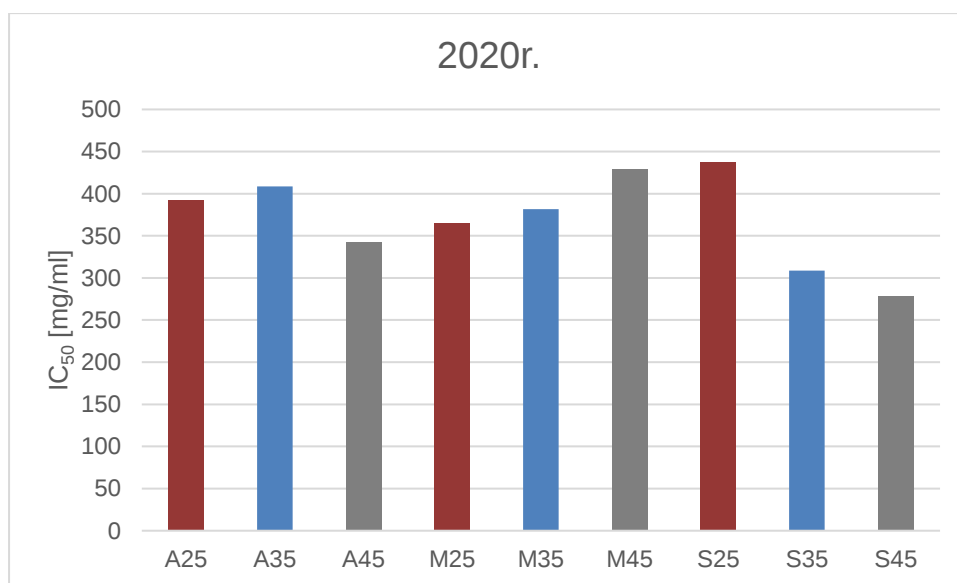


Rys. 64. Wymagane stężenie substancji zawierającej przeciwutleniacz do usunięcia 50% początkowych rodników DPPH dla prób z 2019r.

Źródło: opracowanie własne

Wnioski dla wyników aktywności antyoksydacyjnej włókien z 2020r. (rys. 65):

- poziom wymaganego stężenia substancji zawierającej przeciwutleniacz do usunięcia 50% początkowych rodników DPPH (IC_{50}) dla prób z 2020r. jest wyższy niż dla prób z 2019r. i 2021r., oznacza to, że badane włókna Inu z 2020r. charakteryzowały się niższą aktywnością antyoksydacyjną niż próby z roku 2019r. i 2021r.
- najsilniejszą aktywnością antyoksydacyjną włókien z danego roku charakteryzowała się odmiana Sara rosnąca w kontroli (S45),
- dla odmiany Modran aktywność antyoksydacyjna włókien spada wraz ze wzrostem wilgotności podłoża w którym len rósł, natomiast dla odmiany Sara parametr ten rośnie wraz ze wzrostem wilgotności gleby,
- dla odmiany Artemida najwyższą aktywnością antyoksydacyjną charakteryzują się włókna z kontroli (A45), najniższą z pośredniego poziomu wilgotności gleby (35% PPW), a pośrednią wartość przyjmują włókna, które rosły w największym stresie suszy (A25).

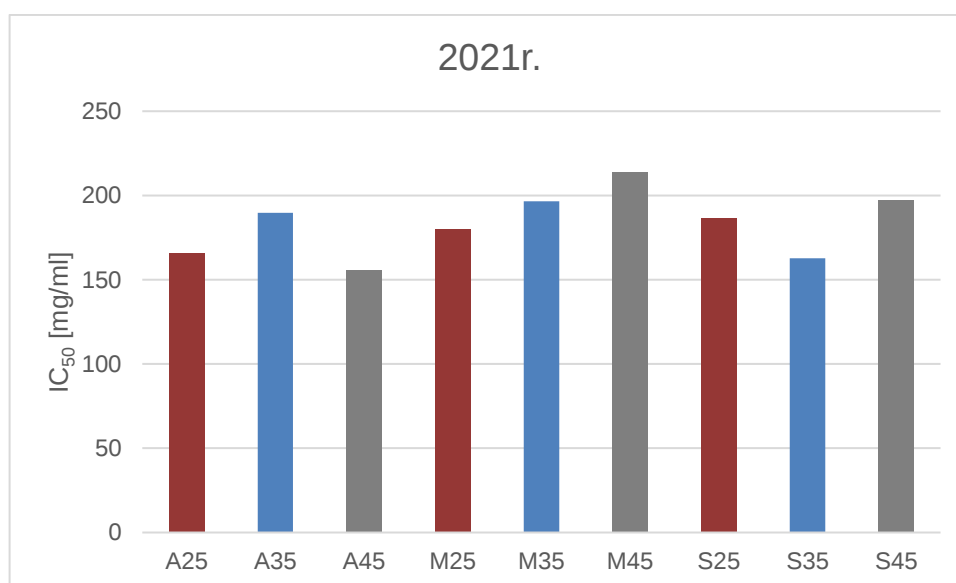


Rys. 65. Wymagane stężenie substancji zawierającej przeciwutleniacz do usunięcia 50% początkowych rodników DPPH dla prób z 2020r.

Źródło: opracowanie własne

Wnioski dla wyników aktywności antyoksydacyjnej włókien z 2021r. (rys. 66):

- poziom wymaganego stężenia substancji zawierającej przeciwutleniacz do usunięcia 50% początkowych rodników DPPH (IC_{50}) dla prób z 2021r. jest najniższy w porównaniu z próbami z 2019r. oraz 2020r., co oznacza, że badane włókna lnu z 2021r. charakteryzowały się najwyższą aktywnością antyoksydacyjną niż włókna z poprzednich lat,
- najsilniejszą aktywnością antyoksydacyjną wśród wszystkich odmian charakteryzowały się włókna odmiany Artemida rosnące w kontroli (A45),
- aktywność antyoksydacyjna włókien odmiany Modran spada wraz ze wzrostem wilgotności gleby,
- aktywność antyoksydacyjna włókien odmiany Sara jest najwyższa dla pośredniego poziomu wilgotności gleby, w której len rósł (35% PPW), a najniższa dla kontroli (S45), dla najwyższego stresu suszy (S25) przyjmuje pośrednią wartość,
- aktywność antyoksydacyjna włókien odmiany Artemida jest najwyższa dla kontroli (45% PPW), a najniższa dla włókien rosnących w glebie o poziomie wilgotności 35% PPW (A35), dla najwyższego stresu suszy (A25) przyjmuje pośrednią wartość.



Rys. 66. Wymagane stężenie substancji zawierającej przeciwutleniacz do usunięcia 50% początkowych rodników DPPH dla prób z 2021r.

Źródło: opracowanie własne

Aktywność antyoksydacyjna badana metodą DPPH koresponduje częściowo z wynikami włókna Inianego metodą FRAP. Należy zwrócić uwagę, że im wyższa wartość IC_{50} , tym efektywność danego antyutleniacza jest mniejsza. W 2019r. wyniki badań z obu metod są adekwatne w przypadku włókien odmiany Artemida, gdzie zdolność do antyoksydacji jest największa w przypadku kontroli (A45). Podobna zależność ma również miejsce dla włókien odmiany Modran (M45). Obie metody potwierdziły, że włókna odmiany Sara, pochodzące z pośredniego stresu suszy (S35) charakteryzują się najniższą aktywnością antyoksydacyjną. Natomiast w 2020r. wyniki pokazują taką samą zależność dla odmiany Artemida (A35, A45). Wspólne zależności metod DPPH i FRAP przedstawiają również wyniki odmiany Sara z 2021r. W większości przypadków, żadne włókno, poza trzema wyjątkami z 9 prób pozyskane z każdej badanej odmiany Inu uprawianego w warunkach stresu suszy 25% PPW nie osiągnęło najwyższego poziomu aktywności antyoksydacyjnej za wyjątkiem Sary w 2019r. oraz Modranu w 2020r. i 2021r. dla metody DPPH. Wyniki mogą się różnić ze względu na to, że obie metody mierzą różne właściwości przeciwutleniające danej substancji oraz charakteryzują się różnymi zakresami czułości.

4.4.2.3. Analiza korelacji zawartości lignin i kwasów fenolowych we włóknach Inianych

Analiza korelacji r Pearsona pozwoliła określić współzmiennność zawartości lignin do zawartości kwasów fenolowych we włóknach Inianych. Ogólna analiza danych, bez uwzględnienia podziału na odmiany oraz roku przeprowadzonego doświadczenia, wykazała istotną statycznie, dodatnią i słabą korelację zawartości lignin do kwasu fenolowego tylko w przypadku zawartości kwasu *p*-kumarowego. Okazuje się, że im większa była procentowa zawartość lignin w badanych próbkach Inu, tym większa była w nich zawartość kwasu *p*-kumarowego (tabela 29).

Tabela 29. Wyniki analizy korelacji r Pearsona sprawdzającej współzmiennność zawartości lignin, a zawartości kwasów fenolowych we włóknach Inu bez względu na odmianę i rok pomiaru

Zmienna		Zawartość lignin [%]
Zawartość kwasu syringowego [mg/100g]	r Pearsona	0,39
	istotność	0,11
Zawartość kwasu synapinowego [mg/100g]	r Pearsona	0,34
	istotność	0,16
Zawartość kwasu p -kumarowego [mg/100g]	r Pearsona	0,28
	istotność	0,04
Zawartość kwasu ferulowego [mg/100g]	r Pearsona	-0,20
	istotność	0,24

Źródło: opracowanie własne

Analiza korelacji rho Spearmana, sprawdzająca współzmiennność zawartości lignin i zawartości kwasów fenolowych we włóknach Inianych dla poszczególnych odmian na przestrzeni lat 2019–2021 wykazała istotnie statystycznie zależności w przypadku włókien odmiany Sara z 2019r., gdzie wraz ze wzrostem procentowej zawartości lignin we włóknach, zmniejszała się zawartość kwasu p -kumarowego. Związek ten był bardzo silny, na co wskazuje wartość współczynnika rho Spearmana równy -0,87. Pozostałe analizy wykazały brak istotnych zależności zawartości kwasów fenolowych od zawartości lignin w badanych włóknach Inianych.

4.4.3. Podsumowanie

Hipoteza szczegółowa nr 3 zakłada, że warunki uprawy roślin Inu, w zakresie wilgotności gleby, wpływają na zawartość kwasów fenolowych we włóknach, a tym samym na ich aktywność antyoksydacyjną.

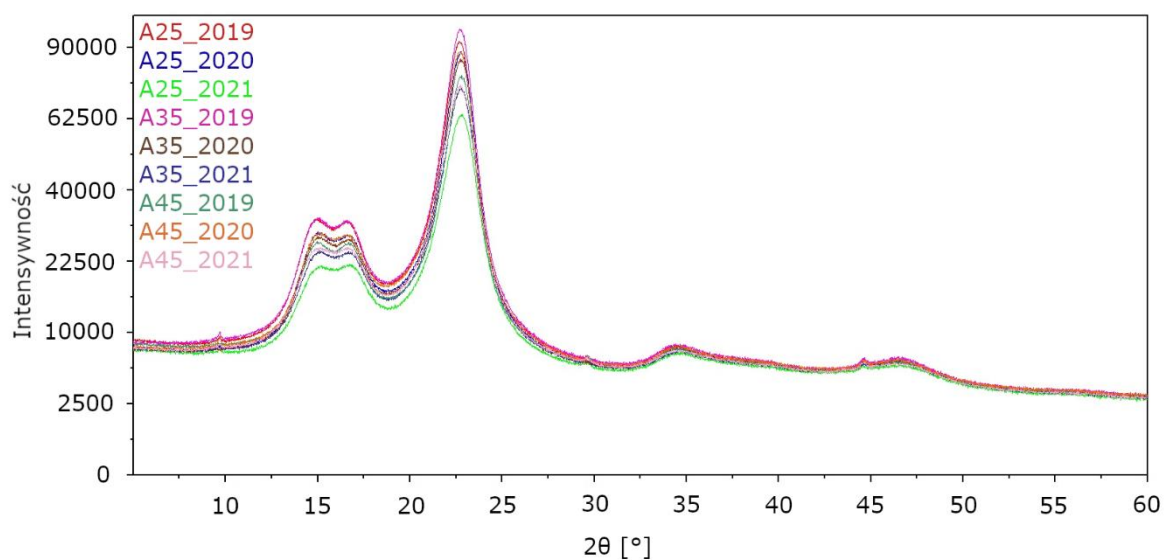
Pomimo rozbieżności wyników badań zawartości kwasów fenolowych oraz aktywności antyoksydacyjnej włókna, prowadzonych na przestrzeni lat doświadczenia, wynikających ze zróżnicowanych warunków pogodowych w okresie rośnięcia słomy Inianej, analiza statystyczna wyników badań pozwoliła na sformułowanie adekwatnych wniosków. Zbadano zawartość kwasu syringowego, synapinowego, p -kumarowego oraz ferulowego we włóknach Inu, które oceniono

indywidualnie. Susza wpłynęła pozytywnie na zawartość kwasu *p*-kumarowego dla odmiany Artemida oraz Modran. Włókna odmiany Sara charakteryzowały się niższą zawartością tego kwasu w przypadku deficytu wody podczas wzrostu roślin. Susza wpłynęła negatywnie na zawartość kwasu syringowego, którego ilość była istotnie niższa we włóknach pochodzących z najwyższego poziomu suszy. Susza wpływała pozytywnie na zawartość kwasu synapinowego we włóknach Inu dla odmian Artemida oraz Sara. Susza wpłynęła negatywnie na zawartość kwasu ferulowego we włóknach Inu, a jego największą zawartością charakteryzowały się włókna odmiany Artemida. Wyniki badań aktywności antyoksydacyjnej tych odmian mierzonej metodą FRAP wykazały, że susza wpływa negatywnie na działanie przeciwutleniające włókien. W przypadku metody DPPH, wyznaczenie wymaganego stężenia substancji zawierającej przeciwutleniacz w celu usunięcia 50% początkowych rodników DPPH pomogło ocenić efektywność badanych włókien do antyoksydacji. W większości przypadków, odmiany Inu, które były uprawiane w warunkach stresu suszy, nie osiągnęły najwyższego poziomu aktywności antyoksydacyjnej. Podsumowując, wyniki badań potwierdzają hipotezę szczegółową nr 3. Wilgotność gleby w okresie wzrostu roślin ma wpływ na zawartość kwasów fenolowych, a stres suszy powoduje niższą zdolność antyoksydacyjną włókien Inu, czego przyczyną jest wykorzystanie rezerwy antyoksydacyjnej przez rośliny do neutralizowania szkodliwego wpływu deficytu wody. Nie mniej jednak należy wspomnieć, iż jest jeszcze inny czynnik zmienny, którego wpływu nie można wyeliminować w badaniach prowadzonych w rzeczywistych warunkach, tj. czynnik pogodowy. Zawartość kwasów fenolowych oraz zdolność włókna do neutralizacji wolnych rodników jest również zależna od warunków pogodowych podczas procesu rośnięcia słomy, które determinują aktywność mikroorganizmów powodujących rozkład substancji niecelulozowych wydzielając przy tym enzymy mające wpływ na tworzenie kwasów fenolowych (Amin Alnajar i in. 2012, Sharma i in. 1992).

4.5. Szerokokątowa dyfraktoметрия rentgenowska włókien Inianych

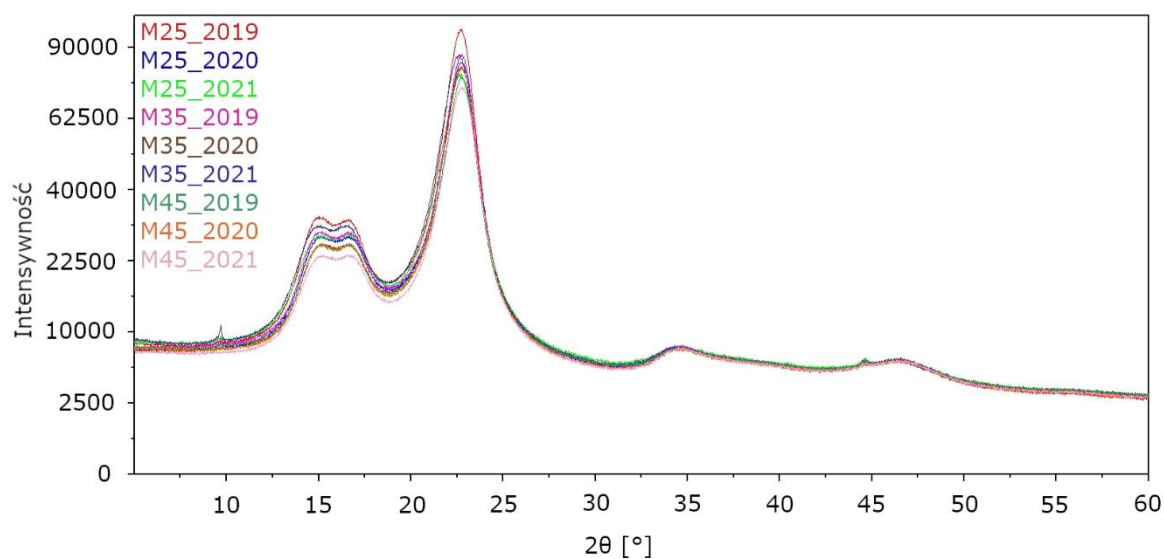
Szerokokątowa dyfraktoметрия rentgenowska (WAXD) jest techniką, która pozwala analizować struktury krystaliczne materiałów przy użyciu promieni rentgenowskich. Metoda ta umożliwia ocenę ilości promieniowania, które uginają się na fazie krystalicznej na skutek dyfrakcji promieniowania X, które przenika przez próbkę włókna (Urbańczyk 2002). Struktura krystaliczna wpływa na parametry wytrzymałościowe włókien. Poznanie struktury krystalicznej pomaga zrozumieć, dlaczego dane włókno zachowuje się w określony sposób oraz pozwala dostosować je do konkretnych zastosowań. We włóknie tylko celuloza charakteryzuje się krystalicznym sposobem agregacji makrocząsteczek. Pozostałe składniki niecelulozowe to polimery o strukturze amorficznej, które zmniejszają wytrzymałość oraz moduł sprężystości włókien (Huo i in. 2013). Wyniki prób włókien Inu odmiany Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z lat 2019, 2020 oraz 2021 oceniono pod względem wpływu stresu suszy podczas wegetacji roślin na strukturę krystaliczną badanego materiału.

Porównanie profili dyfrakcji rentgenowskiej zarejestrowanych dla wszystkich badanych wariantów włókien Inu przedstawiono na rysunkach: 67, 68 oraz 69. W zakresie kątów odbłyśku $2\theta = 0-60^\circ$, charakterystyczne piki dyfrakcyjne zlokalizowano na 2θ : $14,95-15,20^\circ$; $16,77-16,91^\circ$; $22,56-22,74^\circ$, które odpowiadają pikom kątów odbłyśku celulozy natywnej, które wynoszą 15° , 17° oraz $22,7^\circ$ (Borysiak i Doczekalska 2005).



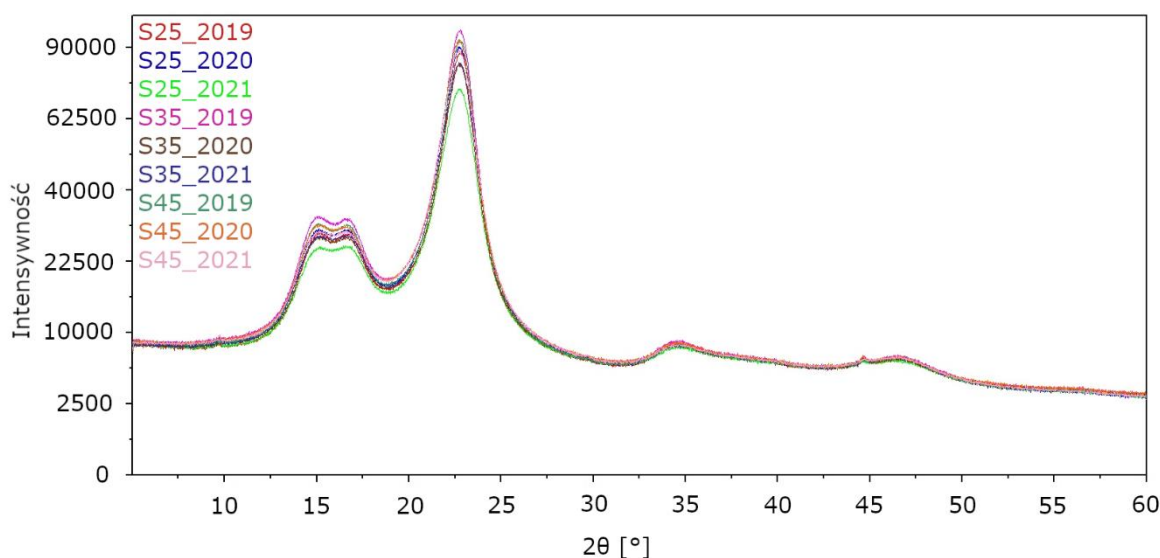
Rys. 67. Dyfraktogram WAXD włókien Inu odmiany Artemida pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019, 2020 oraz 2021r.

Źródło: opracowanie własne



Rys. 68. Dyfraktogram WAXD włókien Inu odmiany Modran pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019, 2020 oraz 2021r.

Źródło: opracowanie własne



Rys. 69. Dyfraktogram WAXD włókien Inu odmiany Sara pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019, 2020 oraz 2021r.

Źródło: opracowanie własne

Zmiany pomiędzy uzyskanymi profilami WAXD są nieznaczne, dlatego oceniono wpływ suszy na strukturę krystaliczną włókien, bazując na metodach numerycznych, zbadano stopień krystaliczności z wykorzystaniem oprogramowania WAXSFIT. Metoda opracowana przez Hindeleha i Johnsona pozwala dokonać rozkładu krzywej dyfrakcyjnej na elementy składowe: piki krystaliczne oraz tło amorficzne (Rabiej 2002). Wyznaczono teoretyczną krzywą w celu obliczenia obszaru pod krzywymi składników krystalicznych i amorficznych, co umożliwiło oznaczenie zawartości fazy krystalicznej (χ_c) na podstawie równania (Masqsood i in. 2017):

$$\chi_c = \frac{A_c}{A_c + A_a} \cdot 100 \quad (11)$$

gdzie:

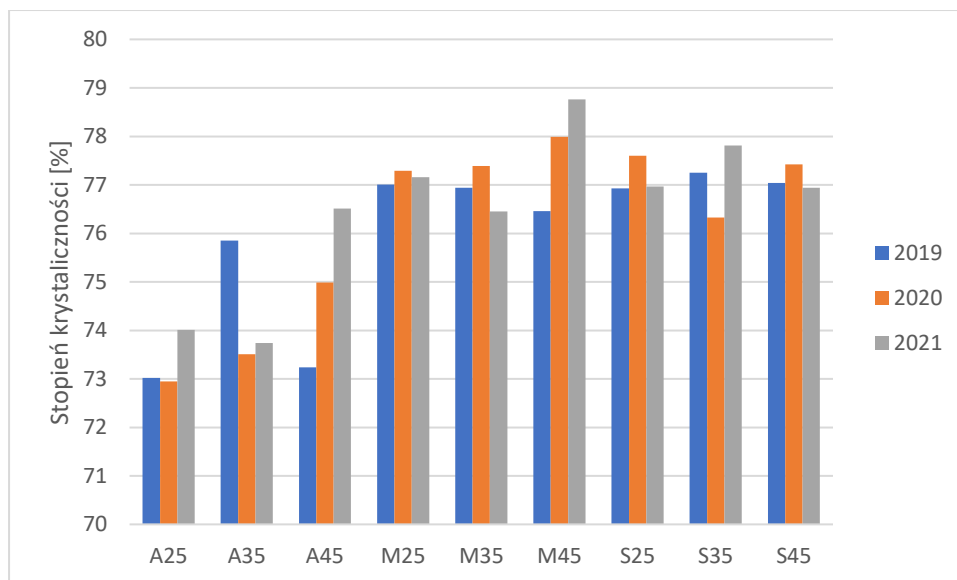
χ_c – stopień krystaliczności [%],

A_a – pole powierzchni pod krzywą amorficzną,

A_c – pole powierzchni pod krzywą krystaliczną.

Rysunek 70 przedstawia wyniki stopnia krystaliczności włókien lnianych odmiany Artemida, Modran oraz Sara, które pochodziły z uprawy w warunkach kontroli oraz stresu suszy z trzech lat prowadzonego doświadczenia. Włókna charakteryzowały się stopniem krystaliczności na poziomie od 72,95% do 78,76%. Wyniki badań wykazały jednak, że deficyt wody podczas wzrostu roślin nie wpłynął znacząco na stopień krystaliczności włókien lnu. Tylko w przypadku odmiany Artemida z 2020r. można stwierdzić, że wraz ze wzrostem wilgotności gleby wzrasta stopień krystaliczności w badanym włóknie. Najniższe wartości tego parametru osiągają włókna odmiany Artemida w porównaniu z odmianami Modran oraz Sara. Powiązania dotyczące wpływu stopnia krystaliczności na wytrzymałość właściwą włókien są adekwatne tylko dla włókien odmiany Modran w przeprowadzonym doświadczeniu w 2019 oraz 2020r.

Podsumowując, hipotezę szczegółową nr 4 należy odrzucić. Susza podczas okresu wegetacji roślin lnu nie wpływa znacząco na stopień krystaliczności włókien.



Rys. 70. Stopień krystaliczności włókien lnianych pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019, 2020 oraz 2021r.

Źródło: opracowanie własne

4.6. Ocena cech włókna badanych odmian Inu

Treść hipotezy szczegółowej nr 5 odnosi się do wpływu suszy na jakość włókien Inianych z uwzględnieniem specyfiki odmian Inu. Tabele nr 30 oraz nr 31 graficznie przedstawiają wyniki oceny włókien, które były narażone na najwyższy stres suszy na poziomie 25% PPW, danej odmiany, w danym roku doświadczenia, a osiągnęły najlepsze rezultaty pod względem włókienniczym oraz aktywności biologicznej w porównaniu do badanych odmian.

Tabela 30. Ocena istotnych dla zastosowań włókienniczych parametrów włókna pozyskanego z badanych odmian Inu, narażonych na stres suszy na poziomie 25% PPW

Rok	2019			2020			2021		
Odmiana	Artemida	Modran	Sara	Artemida	Modran	Sara	Artemida	Modran	Sara
Największa wydajność włókna		✓	✓		✓			✓	
Największa długość średnia wagowa	✓					✓			✓
Najniższa masa liniowa		✓		✓			✓		
Największa wytrzymałość właściwa			✓			✓	✓		
Największa zawartość substancji woskowych i tłuszczowych	✓					✓		✓	
Najmniejsza zawartość lignin			✓	✓				✓	

Źródło: opracowanie własne

Odmianą Inu o najwyższej wydajności włókna we wszystkich trzech latach prowadzenia eksperymentu okazała się odmiana Modran, natomiast odmianą dostarczającą włókno o najwyższej długości w warunkach suszy jest Sara w latach 2020 i 2021, natomiast w 2019 była to odmiana Sara. Najniższą masą liniową

w dwóch kolejnych latach 2020 i 2021 charakteryzowało się włókno pochodzące od odmiany Artemida, przy czym w 2019r. było to włókno odmiany Modran. Pod względem wytrzymałości właściwej najwyższe wartości tego parametru zanotowano dla włókna odmiany Sara w latach 2019 i 2020, w roku 2021 była to odmiana Artemida. Najniższą zawartość lignin i najwyższą zawartość wosków i tłuszczu wykazywały włókna pochodzące od innej odmiany w każdym roku prowadzenia eksperymentu, brak tu podstaw wytypowania odmiany o najkorzystniejszych wartościach tych parametrów we włóknie. Wysoka zawartość lignin zwiększa sztywność i łamliwość włókna wpływając negatywnie na jego przędlivość. Z kolei zawartość wosków i tłuszczu wpływa na zmniejszenie siły tarcia między przesuwającymi się względem siebie włóknami oraz między włóknami, a elementami roboczymi zgrzeblarek, czesarek do włókna długiego oraz kolejnych maszyn do formowania i pocieniania taśm, niedoprzędzarek i przędzarek.

Do wytypowania odmiany Inu, która w okresie suszy dostarcza włókno o najlepszych wartościach parametrów pod względem ich przędlivości, opracowano algorytm, w którym za osiągnięcie najkorzystniejszej wartości najważniejszych parametrów, tj. wydajności włókna, masy liniowej i wytrzymałości właściwej przyznano 1,5 punktu, ponieważ od tych właściwości włókna zależy ilość i jakość otrzymanych przędz. Długość włókna uznano jako parametr o drugiej co do wartości ważności dla procesów przędzenia, ponieważ w przypadku długości nieodpowiedniej do przędzenia systemem mokrym dla włókna długiego, zawsze można wykorzystać inne systemy przędzenia dla włókna krótkiego, dlatego odmianie o najwyższej długości włókna przyznano 1,2 punktu. Za najkorzystniejsze wartości pozostałych parametrów zaprezentowanych w tabeli 30 przyznawany został 1 punkt.

Ocena odmiany Inu pod względem właściwości włókna determinujących jego przędlivość wg przyjętego algorytmu pozwoliła na stworzenie rankingu odmian Inu:

1. Sara: $3 \times 1,5 + 2 \times 1,2 + 2 = 8,9$
2. Modran: $4 \times 1,5 + 2 = 8$
3. Artemida: $3 \times 1,5 + 1,2 + 2 = 7,7$

W wyniku przeprowadzonych badań, których rezultaty zawarte zostały w tabeli 30, należy stwierdzić, że odmiana Sara wykazuje większą odporność na skutki zmian klimatycznych w porównaniu z pozostałymi odmianami badanymi w ramach pracy doktorskiej i w warunkach stresu suszy dostarcza włókno o najkorzystniejszych właściwościach świadczących o jego przędlivości.

Tabela 31. Ocena aktywności biologicznej oraz struktury krystalicznej włókna pozyskanego z badanych odmian lnu, narażonych na stres suszy na poziomie 25% PPW

Rok	2019			2020			2021		
Odmiana	Artemida	Modran	Sara	Artemida	Modran	Sara	Artemida	Modran	Sara
Największa zawartość kwasu <i>p</i> -kumarowego	✓				✓		✓		
Największa zawartość kwasu syringowego									✓
Największa zawartość kwasu synapinowego									✓
Największa zawartość kwasu ferulowego	✓								✓
Największa aktywność antyoksydacyjna (FRAP)			✓	✓					✓
Największa aktywność antyoksydacyjna (DPPH)			✓		✓		✓		
Największa struktura krystaliczna		✓				✓		✓	

Źródło: opracowanie własne

Analizując wyniki badań aktywności antyoksydacyjnej włókna zaprezentowane w Tabeli 31 skoncentrowano się na wartościach parametrów FRAP i DPPH. Za każdą wartość parametru świadczącą o najwyższej aktywności

włókna, przyznano odmianie 2 punkty. Ranking badanych odmian lnu pod kątem ich aktywności biologicznej zaprezentowany jest poniżej:

1. Sara: $3 \times 2 = 6$
2. Artemida: $2 \times 2 = 4$
3. Modran: $1 \times 2 = 2$

Za odmianę, która w okresie suszy dostarcza włókno o najwyższej aktywności antyoksydacyjnej spośród badanych w ramach dysertacji odmian należy uznać odmianę Sara.

Podsumowując, analizując wyniki badań pod względem wytypowania najlepszej odmiany lnu jednocześnie pod względem włókienniczym oraz aktywności biologicznej, należy stwierdzić, że na tle pozostałych odmian wyróżnia się włókna odmiany Sara, które na przestrzeni lat osiągają najlepsze rezultaty pod względem wymienionych powyżej cech. Wyniki badań wykorzystujących szerokokątową dyfraktometrię rentgenowską wskazały, że włókno o najwyższym stopniu krystaliczności w warunkach suszy jest dostarczane przez odmianę lnu Modran.

5. PODSUMOWANIE

Celem niniejszej rozprawy doktorskiej było rozwiązanie problemu badawczego: czy właściwości włókna lnianego zależą od zmian klimatycznych w szczególności od postępującego niedoboru wody na obszarach rolnych, szczegółowe zidentyfikowanie różnic jakościowych włókien lnianych, które pochodzą z roślin narażonych na stres suszy podczas okresu wegetacji oraz określenie poziomu zawartości kwasów fenolowych, aktywności antyoksydacyjnej i struktury krystalicznej włókien.

Realizację badań oparto na wytypowaniu trzech odmian lnu włóknistego, które są powszechnie znane i uprawiane na terenie Polski: Artemida, Modran oraz Sara. Podczas trzyletniego doświadczenia wazonowego, które było prowadzone w hali wegetacyjnej, w sposób kontrolowany ograniczono roślinom dostęp do wody w celu utworzenia warunków stresowych. W celu wydobycia włókien o parametrach, w tym masie liniowej oraz właściwościach mechanicznych, które są odpowiednie do wykorzystania włókna w przemyśle odzieżowym, roszone słomę lnianą metodą ślania. Pozyskane z wyroszonej słomy włókna poddano szeregowi badań, oceniając ich jakość, zawartość substancji aktywnych oraz strukturę krystaliczną. W każdym roku prowadzonego eksperymentu, przed przystąpieniem do rozpoczęcia doświadczenia wazonowego, pobierano próbki gleby w celu określenia jej jakości, upewniając się by różnice zawartości mikro i makro elementów oraz zawartości pH nie wpływały na potencjalne zaburzenia w rozwoju rośliny oraz na rozwój włókna. Tożsame metody prowadzenia doświadczenia zostały zastosowane w celu osiągnięcia rzetelnych wyników badań oraz sformułowania wiarygodnych wniosków, jednocześnie ograniczając liczbę zmiennych niezależnych, które mogłyby wpływać na właściwości materiału badawczego.

Zasadnicza hipoteza pracy zakłada, że:

Deficyt wody w glebie podczas okresu wzrostu lnu wpływa na jakość włókien lnianych oraz na zawartość substancji aktywnych we włóknie.

Powszechnie panujące przekonanie, mówiące o tym, że susza wpływa negatywnie na jakość plonu, mogłoby wzbudzić wątpliwości nad celowością przeprowadzenia wymienionych wyżej badań. Celem badań naukowych jest potwierdzenie lub zanegowanie konkretnych opinii publicznych w sposób wiarygodny, z wykorzystaniem nowoczesnych metod badawczych. Stąd hipoteza zasadnicza w niniejszej rozprawie doktorskiej została zweryfikowana na podstawie odpowiednio zaplanowanego eksperymentu hodowli lnu w warunkach stresu suszy oraz metodyki umożliwiającej obiektywną ocenę włókna. Niemniej jednak, wyniki niektórych z nich, okazały się zaskakujące, a słuszność hipotezy zasadniczej założenie oparte na prawdopodobieństwie sprawdzano weryfikując hipotezy szczegółowe.

Hipoteza szczegółowa nr 1 zakłada, że:

Susza w okresie wegetacji lnu wpływa na wydajność włókna, średnią długość wagową, masę liniową, wskaźniki przy rozciąganiu statycznym oraz na strukturę zewnętrzną włókien lnu.

Włókna lniane, które były formowane w łodydze rośliny w okresie jej wzrostu w warunkach największej suszy charakteryzowały się najniższą masą liniową oraz najwyższą wytrzymałością właściwą w porównaniu do włókien, które pochodziły z roślin uprawianych na glebie o optymalnej wilgotności podczas wzrostu. Niska masa liniowa oraz wysoka wytrzymałość mechaniczna to cechy włókna najbardziej pożądane w przemyśle włókienniczym. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że susza w okresie wegetacyjnym lnu może powodować, że jakość włókna lnianego będzie lepsza. Jednakże procentowa zawartość włókna w słomie lnianej maleje wraz ze wzrostem deficytu wody w glebie podczas okresu wegetacji, co wpływa negatywnie na opłacalność uprawy. Włókna odmiany Artemida charakteryzowały się najniższą masą liniową w porównaniu do włókna pozostałych odmian. Przemysł tekstylny stawia wymagania, które dotyczą dostarczania jak najlepszej wytrzymałości właściwej włókien, w celu zminimalizowania zrywów podczas przędzenia oraz wytworzenia przędzy o parametrach mechanicznych umożliwiających jej dalsze wykorzystanie w procesach tkania lub dziania oraz

osiągnięcia jak najlepszych parametrów wyrobu końcowego. Oprócz wspomnianej powyżej zależności dotyczącej statystycznie istotnej wyższej wytrzymałości właściwej włókien wszystkich odmian w przypadku deficytu wody podczas wzrostu, włókna odmian Artemida oraz Sara charakteryzowały się wyższą wartością tego parametru niż włókna odmiany Modran. Wyniki badań potwierdziły przypuszczenia, wraz ze wzrostem suszy średnia, wagowa długość włókien maleje. Len potrzebuje wystarczającej ilości wody, aby wytworzyć włókna o odpowiedniej wydajności i optymalnych parametrach dla przemysłu tekstylnego. Analiza mikroskopowa widoków wzdłużnych oraz przekrojów poprzecznych wykazała, że susza nie wpływa znacząco na wygląd i strukturę włókien lnianych. Jednakże, obrazy SEM potwierdziły, że włókna pozyskane z roślin uprawianych w warunkach kontrolowanego niedoboru wody w glebie były cieńsze niż te z prób kontrolnych. Na podstawie otrzymanych wyników, potwierdza się słuszność hipotezy szczegółowej nr 1, z wyjątkiem wpływu suszy na strukturę zewnętrzną włókien lnu. Wyniki oceny rezultatów eksperymentu potwierdzają, że susza w okresie wegetacji lnu wpływa negatywnie na wydajność włókna, średnią długość wagową, ale pozytywnie na masę liniową, wskaźniki przy rozciąganiu statycznym. Rośliny lnu uprawiane w warunkach deficytu wody dostarczają włókno o wyższej jakości, tzn. niższej masie liniowej i wyższej wytrzymałości, aczkolwiek wydajność włókna i jego długość jest istotnie niższa od włókna pochodzącego od roślin hodowanych w warunkach kontroli.

Hipoteza szczegółowa nr 2 zakłada, że:

Susza w okresie wegetacji lnu wpływa na skład chemiczny włókien lnianych, w szczególności na zawartość lignin oraz substancji woskowych i tłuszczowych.

Chemiczna analiza składu włókien wykazała, że zawartość substancji woskowych i tłuszczowych we włóknach lnianych była istotnie wyższa w przypadku materiału badawczego, który pochodził z kontroli niż w przypadku deficytu wody na poziomie 25% PPW gleby. Poziom wilgotności w glebie podczas wzrostu roślin ma również wpływ na zawartość lignin we włóknach lnianych, gdzie w przypadku 45% PPW ich

ilość jest istotnie mniejsza w porównaniu do włókien pochodzących ze stresu suszy. W trudnych warunkach braku wody roślina uruchamia mechanizmy obronne, m.in. poprzez zwiększenie wytwarzania lignin, które usztywniając włókno chronią roślinę przed mechanicznymi uszkodzeniami. Włókna odmiany Sara cechowały się istotnie wyższą zawartością lignin niż pozostałe odmiany. Przeprowadzona analiza spektralna FTIR-ATR wykazała pasma drgań grup funkcyjnych, które pochodzą od składników chemicznych we włóknie: celulozy, hemicelulozy, pektyn, lignin oraz substancji woskowych i tłuszczowych, z niewielkimi przesunięciami w kolejnych latach prowadzenia doświadczenia. Wyniki badań potwierdzają prawdziwość powyższej hipotezy. Skład chemiczny włókien lnianych w zakresie zawartości substancji woskowych i tłuszczowych oraz lignin zmienia się w zależności od warunków wilgotności gleby w jakich roślina wzrasta. Wraz ze wzrostem suszy maleje ilość substancji woskowych i tłuszczowych dla odmiany Sara oraz Artemida, a dla odmiany Modran wzrasta. Zawartość lignin we włóknach pochodzących ze stresu suszy jest większa w porównaniu do włókien z warunków kontrolnych. Powyżej opisane rezultaty badań wskazują na potwierdzenie hipotezy szczegółowej nr 2.

Hipoteza szczegółowa nr 3 zakłada, że:

Warunki uprawy roślin lnu, w zakresie wilgotności gleby, wpływają na zawartość kwasów fenolowych we włóknach, a tym samym na ich aktywność antyoksydacyjną.

Włókna lniane charakteryzują się naturalnymi właściwościami antybakteryjnymi i antyoksydacyjnymi. W literaturze dostępne są wyniki badań potwierdzające, że styczność wyrobów lnianych ze skórą człowieka w pozytywny sposób oddziałuje na danego użytkownika, zapewniając potencjalne korzyści zdrowotne. Właściwości przeciwutleniające włókien są związane z zawartością kwasów fenolowych, które mogą być w różnym stopniu wchłaniane przez skórę człowieka dzięki właściwościom hydrofilowym oraz lipofilowym. W niniejszej pracy, włókna lniane zostały zbadane pod względem zawartości kwasu syringowego, synapinowego, *p*-kumarowego oraz ferulowego. Wpływ suszy podczas wzrostu roślin wpłynął na

wysoką zawartość kwasu *p*-kumarowego we włóknach. Deficyt wody wywierał negatywny efekt na zawartość kwasu syringowego we włóknach w porównaniu z kontrolą. Wilgotność gleby na poziomie 35% PPW wpłynęła na wyższą zawartość kwasu synapinowego niż 45% PPW. Włókna pochodzące z optymalnego poziomu wilgoci w glebie podczas wzrostu roślin zawierały wyższe wartości kwasu ferulowego w porównaniu z włóknami ze stresu suszy.

Aktywność przeciwutleniająca włókien lnianych zależy w pierwszej kolejności od zawartości antyoksydantów w chemicznej strukturze włókna na co mają wpływ różne czynniki, między innymi odmiana lnu oraz sposób rośnięcia. Wybór metody pozyskania włókien ze słomy lnianej opierał się na wymaganiach jakie są stawiane przez przemysł włókienniczy z przeznaczeniem na odzież. Roszenie słomy lnianej na łące jest silnie uzależnione od warunków pogodowych, na które człowiek nie ma wpływu. Ponadto, mikroorganizmy działające na słomę lnianą wpływają na rozkład substancji sklejających włókna m.in. pektyn oraz lignin, co wpływa na ilość kwasów fenolowych w włóknie. W pracy doktorskiej aktywność antyoksydacyjna została zbadana dwoma metodami: FRAP oraz DPPH, które pozwalają na pomiar różnych właściwości przeciwutleniającej substancji oraz charakteryzują się różnymi zakresami czułości. Bazując na wynikach badań, jest bardzo prawdopodobne, że warunki uprawy roślin lnu w optymalnej ilości wilgotności gleby na poziomie 45% PPW sprzyjają wytworzeniu się aktywności antyoksydacyjnej we włóknach. Rośliny wzrastające w trudnych warunkach stresu suszy, wykorzystują rezerwę antyoksydacyjną walcząc o przetrwanie. Ponadto, analiza zależności zawartości lignin i ilości kwasów fenolowych we włóknach lnianych dla poszczególnych odmian na przestrzeni lat 2019–2021 wykazała istotnie statystycznie zależności jedynie w przypadku włókien odmiany Sara z 2019r., gdzie wraz ze wzrostem procentowej zawartości lignin we włóknach, zmniejszała się zawartość kwasu *p*-kumarowego. Powyżej opisane rezultaty badań pozwalają na potwierdzenie hipotezy szczegółowej nr 3, która dotyczy wpływu suszy na zawartość kwasów fenolowych we włóknach oraz ich aktywność antyoksydacyjną.

Hipoteza szczegółowa nr 4 zakłada, że:

Susza podczas okresu wegetacji roślin Inu wpływa na stopień krystaliczności włókien.

Stres suszy podczas wzrostu roślin nie wpłynął znacząco na stopień krystaliczności włókien Inu. Tylko w jednym przypadku można stwierdzić, korzystny wpływ wzrostu wilgotności gleby na wzrost stopnia krystaliczności włókien. W pozostałych przypadkach różnice nie występują na znaczącym poziomie. Hipotezę szczegółową nr 4 należy odrzucić.

Hipoteza szczegółowa nr 5 zakłada, że:

Susza wpływa na jakość włókien Inianych w zależności od odmiany Inu.

Analizując wyniki badań w celu wytypowania odmiany Inu, o najlepszych cechach pod względem włókienniczym oraz aktywności biologicznej, która w warunkach stresowych w postaci suszy osiąga wyższe wartości badanych parametrów, w porównaniu do pozostałych badanych odmian Inu włóknistego, należy wyróżnić odmianę Sara. Nie mniej jednak wyniki badań potwierdziły, że każda odmiana w sposób indywidualny reagowała na suszę podczas okresu wegetacji roślin (tabela 30, 31). Tym samym, potwierdza się słuszność hipotezy szczegółowej nr 5.

Szczegółowa analiza wyników badań oraz weryfikacja hipotez szczegółowych przemawia za prawdziwością hipotezy głównej niniejszej pracy. Susza podczas wegetacji roślin Inu wpływa na jakość włókien Inianych oraz na zawartość substancji aktywnych. Natura jest niezwykle złożona i trudna do przewidzenia. Niemożliwe do kontrolowania zmiany czynników pogodowych mogą prowadzić do reakcji zachodzących w roślinie w trakcie jej wzrostu, które są nie do końca zbadane. Deficyt wody w glebie podczas okresu wzrostu Inu wpływa na jakość włókien Inianych w bardzo indywidualny sposób w zależności m.in. od odmiany rośliny. Obserwowane ocieplenie klimatu na Ziemi, odpowiedzialne m.in. za susze, jest zjawiskiem zagrażającym faunie, florze i ludzkości, a przeciwdziałanie

temu jest jednym z najważniejszych wyzwań, przed jakimi stoi ludzkość. Wyniki badań prowadzonych w niniejszej pracy doktorskiej potwierdziły, że zmiany te mają wpływ nie tylko na jakość włókna, ale nawet na zawartość substancji aktywnych włókien lnu.

6. WNIOSKI

1. Deficyt wody w glebie podczas okresu wzrostu lnu wpływa na jakość włókien lnianych:
 - w negatywny sposób na wydajność oraz średnią długość wagową,
 - w pozytywny sposób na masę liniową oraz wytrzymałość właściwą włókien.
2. Analiza mikroskopowa widoków wzdłużnych oraz przekrojów poprzecznych włókna potwierdziła, że susza nie wpływa znacząco na strukturę zewnętrzną włókien lnianych.
3. Susza w okresie wegetacji lnu wpływa na skład chemiczny włókien lnianych w zakresie zawartości lignin oraz wosków i tłuszczów. Zawartość substancji woskowych i tłuszczowych jest wyższa we włóknach pochodzących z kontroli niż w przypadku włókien formowanych w roślinie wzrastającej w warunkach stresu suszy na poziomie 25% PPW gleby. Natomiast, zawartość lignin we włóknach lnianych pochodzących z kontroli jest istotnie mniejsza w porównaniu do włókien pochodzących ze stresu suszy.
4. Analiza spektralna FTIR-ATR wykazała pasma drgań grup funkcyjnych, które pochodzą od składników chemicznych we włóknie: celulozy, hemicelulozy, pektyn, lignin oraz substancji woskowych i tłuszczowych. Nie wykazano istotnych różnic struktury molekularnej wierzchniej warstwy badanych włókien, pozyskanych z różnych odmian lnu hodowanych w zróżnicowanych warunkach wilgotności gleby.
5. Deficyt wody w glebie podczas okresu wzrostu lnu wpływa na zawartość kwasów fenolowych we włóknach.
 - Włókna pochodzące z najwyższego stresu suszy charakteryzują się najwyższą zawartością kwasu *p*-kumarowego.
 - Włókna pochodzące z najwyższego stresu suszy charakteryzują się najniższą zawartością kwasu syringowego.
 - Wilgotność gleby na poziomie 35% PPW wpływa na wyższą zawartość kwasu synapinowego niż 45% PPW.

- Włókna pochodzące z kontroli charakteryzują się istotnie wyższą zawartością kwasu ferulowego w porównaniu do włókien ze stresu suszy.
6. Aktywność antyoksydacyjna włókien Inianych badana metodą DPPH koresponduje częściowo z wynikami metody FRAP. Wyniki mogą się różnić ze względu na to, że obie metody mierzą różne właściwości przeciwutleniające danej substancji oraz charakteryzują się różnymi zakresami czułości.
 7. Warunki uprawy roślin Inu w zakresie wilgotności gleby na poziomie 45% PPW skutkują wyższą aktywnością antyoksydacyjną włókna.
 8. Deficyt wody w glebie w okresie wzrostu roślin Inu jest przyczyną obniżonej aktywności antyoksydacyjnej włókna, co wskazuje na fakt, że roślina broniąc się przed negatywnym wpływem suszy wykorzystwała swój potencjał antyoksydacyjny.
 9. Stres suszy podczas okresu wegetacji roślin Inu nie wpływa znacząco na stopień krystaliczności włókien.
 10. Występują różnice wpływu suszy na jakość włókien Inianych w zależności od odmiany Inu. Na podstawie wyników badań, odmiana Inu włóknistego Sara wyróżnia się w większości badanych parametrów, lepszymi cechami pod względem włókienniczym oraz aktywności biologicznej w porównaniu do pozostałych badanych odmian.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Ageeva M. V., Petrovská B., Kieft H., Sal'nikov V. V., Snegireva A. V., Van Dam J. E. G., *Intrusive growth of flax phloem fibers is of intercalary type*, "Planta", 2005, 222(4), s. 565–574, doi: 10.1007/s00425-005-1536-2.
2. Akin D. E., Dodd R. B., Perkins W., Henriksson G., Eriksson, K. E. L., *Spray Enzymatic Retting: A New Method for Processing Flax Fibers*, "Textile Research Journal", 2000, 70(6), s. 486–494, doi: 10.1177/004051750007000604.
3. Alix S., Goimard J., Morvan C., Baley C., Schols H. A., Visser R. G. F., *Influence of pectin structure on the mechanical properties of flax fibres: a comparison between linseed-winter variety (Oliver) and a fibre-spring variety of flax*, w "Pectins and Pectinases", red. Schols H. A., Visser R. G. F., Voragen A. G. J., Wageningen Academic Publishers, 2009, s. 85–96, ISBN: 978-90-8686-108-8, doi: 10.3920/978-90-8686-677-9.
4. Allaby R.G., Peterson G.W., Merriwether D.A., *Evidence of the domestication history of flax (Linum usitatissimum L.) from genetic diversity of the sad2 locus*, „Theoretical and Applied Genetics”, 2005, 112(1), s. 58–65, doi: 10.1007/s00122-005-0103-3.
5. Amin Alnajar Z.A., Abdulla M.A., Ali H.M., Alshawsh M.A., Hadi H.A., *Acute toxicity evaluation, antibacterial, antioxidant and immunomodulatory effects of Melastoma malabathricum*, "Molecules", 2012, 17(3), s. 3547-3559, doi: 10.3390/molecules17033547.
6. Baley C., Bourmaud A., *Average tensile properties of French elementary flax fibers*, "Materials Letters", 2014, 122, s. 159–161, doi: 10.1016/j.matlet.2014.02.030.
7. Benzie I.F.F., Strain J.J., *The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of "Antioxidant Power": The FRAP Assay*, „Analytical Biochemistry", 1996, 239(1), s. 70–76, doi: 10.1006/abio.1996.0292.
8. Berbeć S., *Znaczenie gospodarcze roślin przemysłowych*, „Problemy Ekologii", 2005, 9(4), s. 205–210.

9. Bergfjord C., Holst B., *A procedure for identifying textile bast fibres using microscopy: flax, nettle/ramie, hemp and jute*, "Ultramicroscopy", 2010, 110(9), s. 1192–1197, doi: 10.1016/j.ultramic.2010.04.014.
10. Borysiak S., Doczekalska B., X-ray diffraction study of pine wood treated with NaOH, "Fibres and Textiles in Eastern Europe", 2005, 13(5), s. 87-89.
11. Bourmaud A., Gibaud M., Baley C., *Impact of the seeding rate on flax stem stability and the mechanical properties of elementary fibres*, "Industrial Crops and Products", 2016, 80, s. 17–25, doi: 10.1016/j.indcrop.2015.10.053.
12. Brdar-Jokanović M., *Boron Toxicity and Deficiency in Agricultural Plants*, „International Journal of Molecular Sciences”, 2020, 21(4), 1424, s. 1–20, doi: 10.3390/ijms21041424.
13. Çakir R., *Effect of Water Stress at Different Development Stages on Vegetative and Reproductive Growth of Corn*, Field Crops Research, 2004, 89(1), s. 1–16, doi: 10.1016/j.fcr.2004.01.005.
14. Centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin Uprawnych [online], [dostęp 19 kwietnia 2023], dostępny w Internecie: https://coboru.gov.pl/pl/szczegoly_odmiany?nrodm=4189.
15. Centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin Uprawnych [online], [dostęp 21 marca 2023], dostępny w Internecie: https://www.coboru.gov.pl/pl/kr/kr_gat.
16. Cheemanapallia S., Mopurib R., Gollac R., Anuradha C.M., Chitta S.K., *Syringic acid (SA) – A Review of Its Occurrence, Biosynthesis, Pharmacological and Industrial Importance*, „Biomedicine & Pharmacotherapy”, 2018, 108, s. 547–557, doi: 10.1016/j.biopha.2018.09.069.
17. Chen C., *Sinapic Acid and Its Derivatives as Medicine in Oxidative Stress-Induced Diseases and Aging*, „Oxidative Medicine and Cellular Longevity”, 2016, 3571614, s. 1–10, doi: 10.1155/2016/3571614.
18. Cybulska M., Maik J., *Archaeological Textiles – A Need for New Methods of Analysis and Reconstruction*, "Fibres and Textiles in Eastern Europe", 2007, 15, 5–6, s. 64–65.
19. Czajka A., *Wolne rodniki tlenowe a mechanizmy obronne organizmu*, „Nowiny Lekarskie”, 2006, 75, 6, s. 582–586.

20. De Prez J., Van Vuure A.W., Ivens, J., Aerts G., Van de Voorde I., *Enzymatic treatment of flax for use in composites*, "Biotechnology Reports", 2018, 20, s. 1–19, doi: 10.1016/j.btre.2018.e00294.
21. Działo M., Mierziak J., Korzun U., Preisner M., Szopa J., Kulma A., *The Potential of Plant Phenolics in Prevention and Therapy of Skin Disorders*, „International Journal of Molecular Sciences”, 2016, 17(2), 160, s. 1–41, doi:10.3390/ijms17020160.
22. Easwar Rao D., Chaitanya K. V., *Photosynthesis and antioxidative defense mechanisms in deciphering drought stress tolerance of crop plants*, "Biologia plantarum", 2016, 60, s. 201–218, doi: 10.1007/s10535-016-0584-8.
23. Evert R. F., *Esau's Plant Anatomy: Meristems, Cells, and Tissues of the Plant Body: Their Structure, Function, and Development*, John Wiley & Sons, Inc., 2006, ISBN: 9780471738435, doi: 10.1002/0470047380.
24. FAOSTAT – Food and Agriculture Organization of the United Nations [online], [dostęp 15 grudnia 2022], dostępny w Internecie: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>.
25. Figat R., Świątek A., Nałęcz-Jawecki G., *Kwasy fenolowe jako związki o potencjale antygenotoksycznym występujące w roślinach leczniczych i jadalnych*, „Biuletyn Wydziału Farmaceutycznego Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego”, 2021, 4, s. 28-41.
26. French A., Johnson G. *Cellulose Shapes*, w: Brown RM, Saxena IM, ed. *Cellulose: Molecular and Structural Biology: Selected Articles on the Synthesis, Structure, and Applications of Cellulose*, Springer Netherlands, 2007, s. 257–284.
27. Gałązka A., Łyszcz M., Perzyński A., *Wykorzystanie kwasu kumarowego i ferulowego jako jedyne go źródła węgla przez bakterie z rodzaju Azospirillum wiążące wolny azot*, „Polish Journal of Agronomy”, 2016, 27, s. 137–145.
28. George M., Mussone P.G., Bressler D.C., *Surface and thermal characterization of natural fibres treated with enzymes*, "Industrial Crops and Products", 2014, 53(2), s. 365–373, doi: 10.1016/j.indcrop.2013.12.037.
29. Golonko A., Kalinowska M., Świśłocka R., Świdorski G., Lewandowski W., *Zastosowanie związków fenolowych i ich pochodnych w przemyśle*

- i medycynie*, „Budownictwo i Inżynieria Środowiska”, 2015, 6(4), s. 161–179.
30. Gorshkova T. A., Sal'nikov V. V., Chemikosova S. B., Ageeva M. V., Pavlencheva N. V., Van Dam J. E. G., *The snap point: a transition point in Linum usitatissimum bast fiber development*, „Industrial Crops and Products”, 2003, 18(3), s. 213–221, doi: 10.1016/S0926-6690(03)00043-8.
31. Goudenhooft C., Bourmaud A., Baley C., *Flax (Linum usitatissimum L.) Fibers for Composite Reinforcement: Exploring the Link Between Plant Growth, Cell Walls Development, and Fiber Properties*, „Frontiers in Plant Science”, 2019, 10:411, s. 1–23, doi: 10.3389/fpls.2019.00411.
32. Gryszczyńska A., Opała B., Łowicki, Z., Dreger M., Górską-Pauksztą M., Szulc M., Kamińska E., Litwin E., Struzik P., Dyr W., *Bioactive compounds determination in the callus and hydroalcoholic extracts from Salvia miltiorrhiza and Salvia przewalskii—Preliminary study on their anti-alcoholic activity effects*, „Phytochemistry letters”, 2015, 11(2), s. 399–403, doi: 10.1016/j.phytol.2014.11.009.
33. Grząbka-Zasadzińska A., *Kompozyty polimerów biodegradowalnych z odnawialnymi napełniaczami lignocelulozowymi*, Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań, 2017.
34. Gubbels G. H., Kenaschuk E. O., *Effect of seeding rate on plant and seed characteristics of new flax cultivars*, „Canadian Journal of Plant Science”, 1989, 69, s. 791–795, doi: 10.4141/cjps89-094.
35. Heller K., *Metodyka integrowanej ochrony roślin dla uprawy lnu włóknistego*, Instytut Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich w Poznaniu; Poznań 2012, [online], [dostęp 3 marca 2023], dostępny w Internecie: https://www.agrofagi.com.pl/260,pliki-ukryte-w-menu?nobreakup#plik_577.
36. Heller K., Byczyńska M., *The Impact of Environmental Factors and Applied Agronomy on Quantitative and Qualitative Traits of Flax Fiber*, „Journal of Natural Fibers”, 2015, 12(1), s. 26–38, doi: 10.1080/15440478.2013.879088.
37. Hossain M.A., Mostofa M.G., Fujita M., *Cross Protection by Cold-Shock to Salinity and Drought Stress-Induced Oxidative Stress in Mustard (Brassica campestris L.) Seedlings*, „Molecular Plant Breeding”, 2013, 4(7), s. 50–70, doi:10.5376/mpb.2013.04.0007.

38. Huang D., Ou B., Prior R.L., *The chemistry behind antioxidant capacity assays*, „Journal of Agricultural and Food Chemistry”, 2005, 53(6), s. 1841–1856, doi: 10.1021/jf030723c.
39. Huo S., Ulven C.A., Wang H., Wang X., *Chemical and Mechanical Properties Studies of Chinese Linen Flax and its Composites*, “Polymers and Polymer Composites”, 2013, 21(5), s.275-286, doi: 10.1177/096739111302100502.
40. Hong E., Ketterings Q., McBride M.; *Manganese*, „Nutrient Management Spear Program, Agronomy Fact Sheet Series”, Cornell University, 2010, s. 1-2, [online], [dostęp 15 kwietnia 2023], dostępny w Internecie: <http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/factsheets/factsheet49.pdf>.
41. Hyams E., *Rośliny w służbie człowieka*, PWN Warszawa 1974.
42. IMGW PIB – Dane publiczne, pomiarowo-obserwacyjne Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowego Instytutu Badawczego [online], [dostęp 10 lutego 2022], dostępny w Internecie: https://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne/dane_meteorologiczne/.
43. Jackowski T., Chylewska B., *Przędzalnictwo, Budowa i technologia przędz*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1999, ISBN 83-87198-56-0.
44. Jastrzębska M., Kostrzewska M. K., Wanic M., *Wpływ deficytu wody i interakcji międzygatunkowych na wybrane parametry fizjologiczne roślin jęczmienia jarego i koniczyny czerwonej*, „Fragmenta Agronomica”, 2016, 33(4), s. 44–59.
45. Jeziorny A., Lipp-Symonowicz B., *Nauka o włóknie, Laboratorium*, Skrypty dla szkół wyższych Politechnika Łódzka, Redakcja Wydawnictw Naukowych Politechniki Łódzkiej, 1980.
46. Jeszka M., Flaczyk E., Kobus-Cisowska J., *Związki fenolowe – charakterystyka i znaczenie w technologii żywności*, „Nauka Przyroda Technologie”, 2010, 4(2), s. 1–13.
47. Jhala A.J., Hall L.M., *Flax (Linum usitatissimum L.): Current Uses and Future Applications*, “Australian Journal of basic and Applied Sciences”, 2010, 4(9), s. 4304-4312; ISSN 1991-8178.

48. Kałwa K., *Właściwości antyoksydacyjne flawonoidów oraz ich wpływ na zdrowie człowieka*, „Kosmos”, 2019, 68(1), s. 153–159, doi: 10.36921/kos.2019_2490
49. Kamm A., *Nowe molekularne mechanizmy działania kwasu ferulowego w wybranych modelach komórek nowotworowych*, Rozprawa doktorska, Gdański Uniwersytet Medyczny, 2021.
50. Katalinic V., Milos, M., Kulisic T., Jukic M., *Screening of 70 medicinal plant extracts for antioxidant capacity and total phenols*, „Food Chemistry”, 2006, 94(4), s. 550–557, doi: 10.1016/j.foodchem.2004.12.004.
51. Kessler R.W., Becker U., Kohler R., Goth B. *Steam explosion of flax – a superior technique for upgrading fibre value* “Biomass and Bioenergy”, 1998, 14(3), s. 237–249, doi: 10.1016/S0961-9534(97)10040-X.
52. Kicińska-Jakubowska A., *Wpływ składu mieszanki wełny owiec z terenów górskich i włókien łykowych na właściwości barierowe mat przeznaczonych do izolacji termicznej i akustycznej*, Rozprawa doktorska, Akademia techniczno-Humanistyczna w Bielsku - Białej, 2022.
53. Klemm D., Philipp B., Heinze T., Heinze U., Wagenknecht W., *Comprehensive Cellulose Chemistry*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004, s. 9–29.
54. Kocoń A., *Potrzeby nawożenia mikroelementami*, „Studia i raporty IUNG-PIB”, 2013, 34(8), s. 133-144.
55. Konczewicz W., Kozłowski R., *Application of osmotic pressure for evaluation of quality and quantity of fibre in flax and hemp*, w: *Textiles for Sustainable Development*, Nova Science Publishers, New York, USA 2007, s. 95–102.
56. Konczewicz W., Kozłowski R., Kaniewski R., Wojtysiak J., Podsiedlik W., *Pozyskiwanie włókna roślin łykowych metodą osmotycznego odklejania*, „Biuletyn Len i Konopie”, 2011, 16, s. 34–44.
57. Konczewicz W., Wojtysiak J. *The effect of physical factors on the process of physical-mechanical degumming of flax fibers* “Textile Research Journal”, 2015, 85(4), s. 391–403, doi: 10.1177/0040517514547214.
58. Konczewicz W., Zimniewska M., Valera M. A., *Selection of a retting method for extraction of bast fibers as response to challenges in composite*

- reinforcement*, „Textile Research Journal”, 2017, 88(18), doi: 10.1177/0040517517716902.
59. Kopiński J., Ochal P., Jadczyższyn T., *Produkcyjne i środowiskowe aspekty gospodarowania fosforem*, „Studia i raporty IUNG-PIB”, 2013, 34(8), s. 57–74.
60. Kozłowski R. *Retting of flax in Poland*, w: *The biology and processing of flax*, M. Publications, 1992, s. 251–259.
61. Kozłowski R., Batog J., Konczewicz W., Mackiewicz-Talarczyk M., Muzyczek M., Sedelnik N., Tanska B. *Enzymes in Bast Fibrous Plant Processing*, “Biotechnology Letters”, 2006, 28(10), s. 761–765.
62. Kozłowski R., Mańkowski J., Kubacki A., Kołodziej J., *Efektywny system dekortykacji włókna konopnego i lnianego*, „Biuletyn Len i Konopie”, 2004, 2, s. 40–50.
63. Kozłowski R., Różańska W. *Enzymatic treatment of natural fibres*, w: *Handbook of natural fibres – vol. 2*, Woodhead publishing Limited, 2020, s. 227–244.
64. König M., *Flax Fibre Extraction Techniques in the Late Middle Ages*, “EXARC Journal Issue”, 2020, 2, s. 1–11.
65. Kulczycki G., *Wpływ precyzyjnego nawożenia fosforem i potasem na zmiany zawartości rozpuszczalnych form tych pierwiastków w glebie*, „Fragmenta Agronomica”, 2012, 29(1), s. 70–82.
66. Kurek E., Jaroszuk J., *Żelazo w glebie jako czynnik biokontrolujący rozwój patogenów korzeniowych*, “Postepy Nauk Rolniczych”, 1993, 4, s. 69–80.
67. Kurishbayev A. K., Chernenok V. G., Nurmanov Y. T., Persikova T. F., Zhanzakov B.Z., Kuzdanova R. S., Serikpaeva Z. K., *Meaningful management of soil fertility and flax productivity*, “Arabian Journal of Geosciences”, 2020, 13(787), s. 1–11, doi: 10.1007/s12517-020-05788-8.
68. Kvavadze E., Bar-Yosef O., Belfer-Cohen A., Boaretto E., Jakeli N., Matskevich Z., Meshveliani T., *30,000-Year-Old Wild Flax Fibers*, “Science”, 2009, 325: 5946, s.1359, doi: 10.1126/science.1175404.
69. Lefeuvre A., Bourmaud A., Morvan C., Baley C., *Elementary flax fibre tensile properties: correlation between stress–strain behaviour and fibre*

- composition*, "Industrial Crops and Products", 2014, 52, s. 762–769, doi: 10.1016/j.indcrop.2013.11.043.
70. Lewak S., *Fizjologia roślin : wprowadzenie*, PWN, Warszawa 2009, s. 49, ISBN 978-83-01-15969-6.
71. Lipiński W., Zasobność gleb polski w mikroelementy, „Studia i raporty IUNG-PIB”, 2013, 34(8), s. 121–131.
72. Liu A.H., Li L., Xu M., Lin Y.H., Guo H.Z., Guo D.A., *Simultaneous quantification of six major phenolic acids in the roots of Salvia miltiorrhiza and four related traditional Chinese medicinal preparations by HPLC–DAD method*, „Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis”, 2006, 41(1), s. 48–56, doi: 10.1016/j.jpba.2005.10.021.
73. Mabberley D.J., *Mabberley's Plant-Book*. Cambridge University Press 2017, s. 531, ISBN 978-1-107-11502-6.
74. Mańkowski J., *Wpływ metod roszczenia na ilość i jakość jednopostaciowego włókna lnianego*, „Fragmenta Agronomica”, 2014, 31(2), s. 46–55.
75. Marek J., Antonov V., Bjelkova M., Smirous P., Fischer H., Janosik S., *Enzymatic Bioprocessing – New Tool of Extensive Natural Fibre Source Utilization*, „International Conference on Flax and Other Bast Plants”, 2008, s. 159–169.
76. Masqsood H.S., Bashir U., Wiener J., Puchalski M., Sztajnowski S., Militky J., *Ozone treatment of jute fibers*, „Cellulose”, 2017, 24(3), s. 1543–1553, doi: 10.1007/s10570-016-1164-y.
77. McDougall G. J., Morrison I. M., Stewart D., Weyers J. D. B., Hillman J. R., *Plant fibres: botany, chemistry and processing for industrial use*, „Journal of the Science of Food and Agriculture”, 1993, 62, s. 1–20. doi: 10.1002/jsfa.2740620102.
78. Melelli A., Shah D. U., Hapsari G., Cortopassi R., Durand S., Arnould O., Placet V., Benazeth D., Beaugrand J., Jamme F., Bourmaud A., *Lessons on textile history and fibre durability from a 4,000-year-old Egyptian flax yarn*, „Nature Plants”, 2021, 7(9), s. 1200–1206, doi: 10.1038/s41477-021-00998-8.
79. Mitek M., Gasik A., *Polifenole w żywności. Właściwości przeciwutleniające*, „Przemysł Spożywczy”, 2007, 61(9), s. 36–39.

80. Mishra D.K., Awasthi H., *Quality Evaluation of Flaxseed Obtained from Different Locations*, "Biology and Life Sciences Forum", 2021, 4(1), 70, s. 1–6, doi: 10.3390/IECPS202008754.
81. Mocek A., *Gleboznawstwo*, PWN, Warszawa 2015, ISBN 978-83-01-18795-8.
82. Moulia B., Coutand C., Lenne C., *Posture control and skeletal mechanical acclimation in terrestrial plants: implications for mechanical modeling of plant architecture*, "American Journal of Botany", 2006, 93(10), s. 1477–1489, doi: 10.3732/ajb.93.10.1477.
83. Muzykiewicz A., Zielonka-Brzezicka J., Nowak A., Klimowicz A., *Aktywność antyoksydacyjna ekstraktów sporządzonych ze świeżych i suszonych surowców Ficus carica L.*, „Hygeia Public Health”, 2019, 54(3), s. 201–209.
84. Nithya R., Subramanian S., *Antioxidant properties of sinapic acid: in vitro and in vivo approach*, „Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research”, 2017, 10(6), s. 255–262, doi: 10.22159/ajpcr.2017.v10i6.18263.
85. Nofal O.A., Zedian M.S., Bakry B.A., *Flax yield and quality traits as affected by zinc foliar application under newly reclaimed sandy soil*, "Journal of Applied Sciences Research", 2011, 7(9), s. 1361–1367.
86. Nykter M., *Microbial quality of hemp (Cannabis sativa L.) and flax (Linum usitatissimum L.) from plants to thermal insulation*, Rozprawa doktorska, 2006, University of Helsinki.
87. O'Sullivan A.C., *Cellulose: the structure slowly unravels*, Cellulose, 1997, 4(3), s. 173–207.
88. Ochal P., *Aktualny stan i zmiany żyzności gleb w polsce*, "Studia i Raporty IUNG-PIB", 2015, 45(19), s. 9–25.
89. Oguz M.C., Aycan M., Oguz E., Poyraz I., Yildiz M., *Drought Stress Tolerance in Plants: Interplay of Molecular, Biochemical and Physiological Responses in Important Development Stages*, "Physiologia", 2022, 2(4), s. 180–197, doi: 10.3390/physiologia2040015.
90. Park S., Baker J. O., Himmel M. E., Parilla P. A., Johnson D. K., *Cellulose crystallinity index: measurement techniques and their impact on interpreting cellulase performance*, "Biotechnology for Biofuels", 2010, 3(10).

91. Parus A., *Przeciwutleniające i farmakologiczne właściwości kwasów fenolowych*, „Postępy Fitoterapii”, 2013, 1, s. 48–53.
92. Peyrot C., Mention M. M., Brunissen F., Allais F., *Sinapic Acid Esters: Octinoxate Substitutes Combining Suitable UV Protection and Antioxidant Activity*, „Antioxidants”, 2020, 9(9), 782, doi: 10.3390/antiox9090782.
93. Pękal A.J., *Wpływ doboru procedury analitycznej na wyznaczenie właściwości antyutleniających próbek żywności*, Rozprawa doktorska, Uniwersytet Warszawski, 2014.
94. Phaniendra A., Jestadi D. B., Periyasamy L., *Free radicals: properties, sources, targets, and their implication in various diseases*, „Indian Journal of Clinical Biochemistry”, 2015, 30(1), s. 11–26, doi: 10.1007/s12291-014-0446-0.
95. Phillips R., Rix M., *The Botanical Garden, Volume 2, Perennials and annuals*, Macmillan, London 2011, s. 119, ISBN 0-333-74890-5.
96. Popa V.M., Gruia A., Raba D.N., Dumbrava D., Moldovan C., Bordean D., Mateescu C., *Fatty acids composition and oil characteristics of linseed (*Linum Usitatissimum* L.) from Romania*, “Journal of Agroalimentary Processes and Technologies” 2012, 18(2), s. 136–140.
97. Popis E., Ratusz K., Przybysz M., Krygier K., Sakowska A., Konarska M., *Światowa oraz polska produkcja Inu oleistego i oleju Inianego*, „Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie Problemy Rolnictwa Światowego”, 2015, 15(30), 2, s. 106–116.
98. Praczyk M., Wielgusz K. *Agronomic Assessment of Fibrous Flax and Linseed Advanced Breeding Lines as Potential New Varieties*, “Agronomy”, 2021, 11(10), 1917, s. 1-13, doi: 10.3390/agronomy11101917.
99. Qian H., Nihorimbere V., *Antioxidant power of phytochemicals from *Psidium guajava* leaf*, „Journal of Zhejiang University Science”, 2004, 5(6), s. 676–683, doi: 10.1007/BF02840979.
100. Rabiej M., *Wyznaczanie stopnia krystaliczności polimerów semikrystalicznych za pomocą program komputerowego “OptiFit”*, “Polimery”, 2002, 47(6), s. 423–427.

101. Rabiej M., Rabiej S., *Analiza rentgenowskich krzywych dyfrakcyjnych za pomocą program komputerowego WAXSFIT*, Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, 2006.
102. Roach M.J., Deyholos M.K., *Microarray analysis of flax (*Linum usitatissimum* L.) stems identifies transcripts enriched in fibre-bearing phloem tissues*, "Molecular Genetics and Genomics", 2007, 278, s. 149–165, doi: 10.1007/s00438-007-0241-1.
103. Różańska W., *Innowacyjna metoda osmotycznego pozyskiwania włókien tykowych przeznaczonych do produkcji kompozytów*, Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź 2020.
104. Różański A., *Skład granulometryczny różnych typów gleb w aspekcie ich genezy oraz zmian w klasyfikacji uziarnienia*, "Roczniki Gleboznawcze", 210, 61(3), s. 100–110.
105. Ruan P., Raghavan V., Garipey Y., Du J., *Characterization of flax water retting of different durations in laboratory condition and evaluation of its fiber properties*, "Bioresources", 2015, 10(2), s. 3553–3563, doi: 10.15376/biores.10.2.3553-3563.
106. Ryżak M., Bartmiński P., Biehanowski A., *Metody wyznaczania rozkładu granulometrycznego gleb mineralnych*, "Acta Agrophysica", Rozprawy I Monografie, 2009, nr 4, ISSN 1234-4125.
107. Saleem M.H., Usman K., Rizwan M., Jabri H.A., Alsafran M., *Functions and strategies for enhancing zinc availability in plants for sustainable agriculture*, „Frontiers in Plant Science”, 2022, 13: 1033092, doi: 10.3389/fpls.2022.1033092.
108. Shamanin V.P., Tekin-Cakmak Z.H., Gordeeva E.I., Karasu S., Pototskaya I., Chursin A.S., Pozherukova V.E., Ozulku G., Morgounov A.I., Sagdic O., Koksel H., *Antioxidant Capacity and Profiles of Phenolic Acids in Various Genotypes of Purple Wheat*, „Foods”, 2022, 11(16), 2515, doi: 10.3390/foods11162515.
109. Sharma H.S.S., Lefevre J., Boucaud J., *Role of micro-bial enzymes during retting and their effects on fiber characteristics*, w: *The Biology and Processing of Flax*, red. Sharma H.S.S., Van Sumere C.F., M Publications, Belfast, UK, 1992, s. 157-198.

110. Shen Y., Song X., Li L., Sun J., Jaiswal Y., Huang J., Liu C., Yang W., Williams L., Zhang H., Guan Y., *Protective effects of p-coumaric acid against oxidant and hyperlipidemia-an in vitro and in vivo evaluation*, „Biomedicine & Pharmacotherapy”, 2019, 111, s. 579–587, doi: 10.1016/j.biopha.2018.12.074.
111. Sienkiewicz-Cholewa U., Wróbel S., *Rola miedzi w kształtowaniu wielkości i jakości plonów roślin uprawnych*, „Postępy Nauk Rolniczych”, 2004, 5, s. 35–56.
112. Silska G., Kozak J., Rajewicz M., Mańkowska G., *Charakterystyka morfologiczna genotypów lnu (*Linum usitatissimum* L.) pochodzących z Polski*, „Polish Journal of Agronomy”, 2014, 17, s. 38–47.
113. Singh P.K., Pankaj C., *Double purpose linseed: a viable option for doubling farmers income in the north – western Himalayan region*, „Indian Farming”, 2018, 68(1), s. 49–54.
114. Sirghie C., Istoc I.V., Bungău S., Copolovici L., *Influence of ultrasound field on laccase degumming process*, „Cellulose Chemistry and Technology”, 2015, 49, 9-10, s. 901-904.
115. Skłodowski P., *Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych - PTG 2008*, „Roczniki Gleboznawcze”, 2009, 60(2), s. 5-16.
116. Słuchocka Z., *Gospodarka ściekowa w przemyśle roszarniczym*, „Prace Instytutu Przemysłu Włókien Łykowych”, 1962, 10, s. 103-126.
117. Smole M. S., Hribernik S., Kleinschek K.S., Kreže T., *Plant Fibres for Textile and Technical Applications*, w: *Advances in Agrophysical Research*, 2013, InTech, s. 369-398.
118. Snegireva A. V., Ageeva M. V., Amenitskii S. I., Chernova T. E., Ebskamp M., Gorshkova, T. A., *Intrusive growth of sclerenchyma fibers*, „Russian Journal of Plant Physiology”, 2010, 57, s. 342–355. doi: 10.1134/S102144371003 0052.
119. Snegireva A. V., Chernova T. E., Ageeva M. V., Lev-Yadun S., Gorshkova T., *Intrusive growth of primary and secondary phloem fibres in hemp stem determines fibre-bundle formation and structure*, „AoB Plants”, 2015, 7, plv061, doi: 10. 1093/aobpla/plv061.

120. Staszek D., *Badania związków fenolowych w wybranych gatunkach szalwii (Salvia sp.) metodami chromatograficznymi HPLC i TLC*; Rozprawa doktorska, Uniwersytet Śląski, Katowice, 2012.
121. Stevenson F. C., Wright A. T. *Seeding rate and row spacing affect flax yields and weed interference*, "Canadian Journal of Plant Science", 1996, 76, s. 537–544, doi: 10.4141/cjps 96-098.
122. Strażyński P., Wielgusz K., Pruszyński G., Mrówczyński M., Gorzała G., Matyjaszczyk E., Wachowiak H., Byczyńska M., Praczyk M., Broniarz J., Heller K., Korbas M., Danielewicz J., Kubasik W., Klejdysz T., Węgorek P., Fiedler Ż., Nijak K., Obst A., Kierzek R., Ratajkiewicz H., Mańkowski J., Zamojska J., Dworzańska D., *Metodyka integrowanej ochrony Inu dla doradców*, [online], [dostęp 12 grudnia 2022], dostępny w Internecie: https://www.agrofagi.com.pl/260,pliki-ukryte-w-menu?nobreakup#plik_577.
123. Summerscales J., Dissanayake N., Virk, A., Hall W., *A review of bast fibres and their composites. Part 1–Fibres as reinforcements*, "Composites Part A Applied Science and Manufacturing", 2010, 41(40), s. 1329–1335, doi: 10.1016/j.compositesa.2010. 06.001.
124. Szafer W., Kulczyński S., *Rośliny polskie*, PWN, Warszawa 1953.
125. Szweykowska A., Szweykowski J., *Botanika t. 1 Morfologia*, PWN, Warszawa 2003, s. 121–124, ISBN 83-01-13953-6.
126. Tyszkiewicz Z.E., Czubaszek R., Roj-Rojewski S., *Podstawowe metody laboratoryjnej analizy gleby, Skrypt do zajęć laboratoryjnych z przedmiotu gleboznawstwo dla studentów kierunku architektura krajobrazu Politechniki Białostockiej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2019, e-ISBN 978-83-65596-89-5, doi: 10.24427/978-83-65596-89-5.
127. Urbaniak A., Molski M., Szeląg M., *Quantum-chemical Calculations of the Antioxidant Properties of trans-p-coumaric Acid and trans-sinapinic Acid*, „Computational Methods in Science and Technology”, 2012, 18(2), s. 117–128, doi: 10.12921/cmst.2012.18.02.117-128.
128. Urbańczyk G., *Nauka o włóknie*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1985, s. 153-154, ISBN 83-204-0632-3.
129. Urbańczyk G., *Fizyka włókna*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2002, ISBN 83-7283-039-8.

130. Van Dam J. E. G., Gorshkova T. A., *Cell walls and Fibers | Fiber formation*, w: *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*, Elsevier Ltd 2003, s. 87–96, doi: 10.1016/B0-12-227050-9/00046-6.
131. Wałkowski T., Ladek A., Piotrowska A., *Len oleisty*, IHAR Poznań, 1998.
132. Wertz J-L., Mercier J.P., Bédué O., *Cellulose Science and Technology*, EPFL Press, 2010, doi: 10.1201/b16496.
133. Wielgusz K., Heller K., Baraniecki P., Wolak-Kwaśniewska P. Konieczna A., Oleszak G., *Program Ochrony Lnu*, Instytut Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich - PIB, Poznań 2022.
134. Wilczyńska A., *Metody oznaczania aktywności antyoksydacyjnej miodów pszczelich*, „Bromatologia i Chemia Toksykologiczna”, 2009. 42(3), s. 870–874.
135. Włodarczyk Z. *Rośliny biblijne. Leksykon*. Kraków: Instytut Botaniki im. W. Szafera PAN, 2011. ISBN 978-83-89648-98-3
136. Woyke T., Muśnicki, Cz. *Rośliny włókniste. Len*, w: *Szczegółowa uprawa roślin*, red. Jasińska Z., Kotecki A., AR Wrocław 2003, s. 527-546.
137. Xie D., Dai Z., Yang Z., Tang Q., Sun J., Yang X., Song X., Lu Y., Zhao D., Zhang L., Su J., *Genomic variations and association study of agronomic traits in flax*, „BMC Genomics”, 2018, 19(512), s. 1–12, doi: 10.1186/s12864-018-4899-z.
138. Yan L., Wang B., Kasal B., *Can Plant-Based Natural Flax Replace Basalt and E-Glass for Fiber-Reinforced Polymer Tubular Energy Absorbers? A Comparative Study on Quasi-Static Axial Crushing*, „Frontiers in Materials”, 2017, 4(42), s. 1–10, doi: 10.3389/fmats.2017.00042.
139. Zając T., Klima K., Borowiec F., Witkowicz R., Barteczko J., *Plonowanie odmian lnu oleistego w różnych warunkach siedliska*, „Rośliny Oleiste”, 2002, 23, s. 275–286.
140. Zając T., Oleksy A., Kopyra-Klimek A., *Unikatowe cechy biologiczne i użytkowe lnu zwyczajnego (Linum usitatissimum L.) determinujące znaczenie gatunku w przeszłości oraz współcześnie*, „Krakowskie Studia Małopolskie”, 2011, 15, s.169–196.
141. Zang L., Cosma G., Gardner H., Shi X., Castranova V., Vallyathan V., *Effect of antioxidant protection by p-coumaric acid on low-density lipoprotein*

- cholesterol oxidation*, „American Journal of Physiology-Cell Physiology”, 2000, 279(4), s. 954–960, doi: 10.1152/ajpcell.2000.279.4.C954.
142. Zduńska K., Dana A., Kołodziejczak A., Rotsztein H., *Antioxidant Properties of Ferulic Acid and Its Possible Application*, „Skin Pharmacology and Physiology”, 2018, 31(6), 332–336, doi: 10.1159/000491755.
143. Zimniewska M., *Antioxidant Activity of Fibres Originating from Traditional Varieties of Polish Flax Plants*, “Fibres and Textiles in Eastern Europe”, 2015, 23(6), 114, s.41–47, doi: 10.5604/12303666.1167418.
144. Zimniewska M., Różańska W., Gryszczyńska A., Romanowska B., Kicińska-Jakubowska A., *Antioxidant Potential of Hemp and Flax Fibers Depending on Their Chemical Composition*, “Molecules”, 2018, 23(8), 1993, s. 1–17, doi: 10.3390/molecules23081993.

SPIS TABEL

Tabela 1. Ranking 10 krajów produkujących len włóknisty oraz oleisty w 2020r.

Tabela 2. Skala BBCH formy jarej lnu zwyczajnego

Tabela 3. Charakterystyka i przybliżony skład różnych warstw ściany komórkowej włókien lnianych

Tabela 4. Właściwości botaniczno-użytkowe wybranych odmian lnu zwyczajnego

Tabela 5. Właściwości rolniczo-użytkowe wybranych odmian włóknistych lnu zwyczajnego

Tabela 6. Terminy siewu lnu, zbioru oraz roszenia słomy lnianej w latach 2019–2021

Tabela 7. Średnia temperatura dobowa oraz suma opadów deszczu podczas okresu roszenia słomy w danym roku

Tabela 8. Wyniki analizy jakościowej gleby w latach 2019, 2020, 2021

Tabela 9. Wpływ odmiany lnu i stopnia wilgotności gleby na wskaźnik masy linowej mierzony w trzech kolejnych latach: część I (efekty główne)

Tabela 10. Wpływ odmiany lnu i stopnia wilgotności gleby na wskaźnik masy linowej mierzony w trzech kolejnych latach: część II (efekty interakcji 2 rzędu)

Tabela 11. Wpływ odmiany lnu i stopnia wilgotności gleby na wytrzymałość właściwą mierzoną w trzech kolejnych latach: część I (efekty główne)

Tabela 12. Wpływ odmiany lnu i stopnia wilgotności gleby na wytrzymałość właściwą mierzoną w trzech kolejnych latach: część II (efekty interakcji 2 rzędu)

Tabela 13. Wyniki badań średniej siły zrywającej oraz wydłużenia włókien lnu dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z 2019r., 2020r., 2021r.

Tabela 14. Wyniki badań wilgotności włókien lnianych

Tabela 15. Wyniki badań wilgotności włókien lnianych po zmieleniu

Tabela 16. Wpływ odmiany Inu i stopnia wilgotności gleby na zawartość substancji woskowych i tłuszczowych we włóknie mierzony w trzech kolejnych latach: część I (efekty główne)

Tabela 17. Wpływ odmiany Inu i stopnia wilgotności gleby na zawartość substancji woskowych i tłuszczowych we włóknie mierzony w trzech kolejnych latach: część II (efekty interakcji 2 rzędu)

Tabela 18. Wpływ odmiany Inu i stopnia wilgotności gleby na zawartość lignin we włóknach mierzony w trzech kolejnych latach: część I (efekty główne)

Tabela 19. Wpływ odmiany Inu i stopnia wilgotności gleby na zawartość lignin we włóknach mierzoną w trzech kolejnych latach: część II (efekty interakcji 2 rzędu)

Tab. 20. Analiza rodzaju drgań oraz grup funkcyjnych dla danego zakresu liczb falowych widm FTIR-ATR włókien pochodzących ze wszystkich badanych odmian Inu uprawianych w wytypowanych do doświadczenia zróżnicowanych warunkach wilgotności gleby w trzyletnim okresie trwania eksperymentu

Tabela 21. Zawartość kwasów fenolowych we włóknach Inianych odmian Artemida, Modran oraz Sara uprawianych w warunkach kontroli oraz stresu suszy w 2019r.

Tabela 22. Zawartość kwasów fenolowych we włóknach Inianych odmian Artemida, Modran oraz Sara uprawianych w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2020r.

Tabela 23. Zawartość kwasów fenolowych we włóknach Inianych odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z 2021r.

Tabela 24. Wpływ odmiany Inu i stopnia wilgotności gleby na zawartość kwasu *p*-kumarowego we włóknach, mierzony w trzech kolejnych latach: część I (efekty główne)

Tabela 25. Wpływ odmiany Inu i stopnia wilgotności gleby na zawartość kwasu *p*-kumarowego we włóknach, mierzony w trzech kolejnych latach: część II (efekty interakcyjne)

Tabela 26. Wpływ odmiany Inu i stopnia wilgotności gleby na zawartość kwasu syringowego i synapinowego we włóknie

Tabela 27. Wpływ odmiany lnu i stopnia wilgotności gleby na zawartość kwasu ferulowego, mierzony w dwóch kolejnych latach: część I (efekty główne)

Tabela 28. Wpływ odmiany lnu i stopnia wilgotności na zawartość kwasu ferulowego, mierzony w dwóch kolejnych latach: część II (efekty interakcji)

Tabela 29. Wyniki analizy korelacji r Pearsona sprawdzającej współzmiennność zawartości lignin, a zawartości kwasów fenolowych we włóknach lnu bez względu na odmianę i rok pomiaru

Tabela 30. Ocena istotnych dla zastosowań włókienniczych parametrów włókna pozyskanego z badanych odmian lnu, narażonych na stres suszy na poziomie 25% PPW

Tabela 31. Ocena aktywności biologicznej oraz struktury krystalicznej włókna pozyskanego z badanych odmian lnu, narażonych na stres suszy na poziomie 25% PPW

Tabela 32. Obrazy mikroskopowe SEM przekrojów poprzecznych i widoków wzdłużnych włókien lnu, odmiany Artemida z 2019r.

Tabela 33. Obrazy mikroskopowe SEM przekrojów poprzecznych i widoków wzdłużnych włókien lnu, odmiany Modran z 2019r.

Tabela 34. Obrazy mikroskopowe SEM przekrojów poprzecznych i widoków wzdłużnych włókien lnu, odmiany Sara z 2019r.

Tabela 35. Obrazy mikroskopowe SEM przekrojów poprzecznych i widoków wzdłużnych włókien lnu, odmiany Artemida z 2020r.

Tabela 36. Obrazy mikroskopowe SEM przekrojów poprzecznych i widoków wzdłużnych włókien lnu, odmiany Modran z 2020r.

Tabela 37. Obrazy mikroskopowe SEM przekrojów poprzecznych i widoków wzdłużnych włókien lnu, odmiany Sara z 2020r.

Tabela 38. Obrazy mikroskopowe SEM przekrojów poprzecznych i widoków wzdłużnych włókien lnu, odmiany Artemida z 2021r.

Tabela 39. Obrazy mikroskopowe SEM przekrojów poprzecznych i widoków wzdłużnych włókien Inu, odmiany Modran z 2021r.

Tabela 40. Obrazy mikroskopowe SEM przekrojów poprzecznych i widoków wzdłużnych włókien Inu, odmiany Sara z 2021r.

SPIS ILUSTRACJI

Rys. 1. Porównanie wybranych cech odmian dwóch form lnu: włóknistego i oleistego

Rys. 2. Światowa produkcja oraz powierzchnia uprawy lnu włóknistego w latach 1980-2020

Rys. 3. Światowa produkcja oraz powierzchnia uprawy lnu oleistego w latach 1980-2020

Rys. 4. Schemat wzrostu lnu G: kiełkowanie; VS: etap wegetatywny; F: kwitnienie; SF: tworzenie nasion; FM: dojrzałość włókien; SM: dojrzałość nasion; S: starzenie

Rys. 5. Przekrój poprzeczny dolnej części łodygi lnu barwionego błękitem toluidynowym

Rys. 6. Schemat ilustrujący wydłużenie włókna lnianego A: Pierwsza faza skoordynowanego wzrostu; B: zaawansowany stopień skoordynowanego wzrostu; C: początek inwazyjnego wzrostu z włóknami; D: zaawansowana faza inwazyjnego wzrostu

Rys. 7. Etapy pogrubienia włókna lnianego

Rys. 8. Schemat budowy elementarnego włókna lnu w przekroju poprzecznym

Rys. 9. Mikrofotografia widoków wzdłużnych włókien lnianych

Rys. 10. Mikrofotografia przekrojów poprzecznych włókien lnianych

Rys. 11. Schemat czynników i mechanizmów biorących udział w powstawaniu wolnych rodników i komórkowej odpowiedzi na reaktywne formy tlenu

Rys. 12. Struktura kwasu ferulowego

Rys. 13. Struktura kwasu *p*-kumarowego

Rys. 14. Struktura kwasu syringowego

Rys. 15. Struktura kwasu synapinowego

Rys. 16. Wazony lniane po siewie. Pierwszy dzień doświadczenia – 23.04.2020r.

Rys. 17. Rośliny Inu, 37 dzień wzrostu – 29.05.2019r.

Rys. 18. Średnia dobową temperatura powietrza w miesiącach wegetacji Inu w latach 2019–2021 w miejscowości Słupia Wielka

Rys. 19. Rośliny Inu poddane stresowi suszy, 73 dzień wzrostu – 05.07.2019r.

Rys. 20. Słoma Iniana poddana procesowi roszczenia, 27 dzień roszczenia 21.10.2019r.

Rys. 21. Procentowa zawartość włókna długiego w słomie Inianej w latach 2019, 2020, 2021

Rys. 22. Wyniki badań długości średniej wagowej włókien Inu dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z lat 2019, 2020, 2021

Rys. 23. Wyniki badań średniej masy liniowej włókien Inu dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z lat 2019, 2020, 2021

Rys. 24. Wpływ odmiany Inu i poziomu wilgotności gleby na masę linową włókien – efekt interakcji

Rys. 25. Siła zrywająca włókien w funkcji ich długości

Rys. 26. Wyniki średniej wytrzymałości właściwej włókien Inu dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z 2019r.

Rys. 27. Wyniki średniej wytrzymałości właściwej włókien Inu dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z 2020r.

Rys. 28. Wyniki średniej wytrzymałości właściwej włókien Inu dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z 2021r.

Rys. 29. Wpływu odmiany Inu i stopnia wilgotności gleby na wytrzymałość właściwą włókna – efekt interakcji

Rys. 30. Wyniki badań procentowej zawartości substancji woskowych i tłuszczowych we włóknie dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z 2019r.

Rys. 31. Wyniki badań procentowej zawartości substancji woskowych i tłuszczowych we włóknie dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z 2020r.

Rys. 32. Wyniki badań procentowej zawartości substancji woskowych i tłuszczowych we włóknie dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z kontroli oraz stresu suszy z 2021r.

Rys. 33. Wpływ odmiany Inu i poziomu wilgotności na zawartość substancji woskowych i tłuszczowych we włóknie – efekt interakcji

Rys. 34. Wyniki badań procentowej zawartości lignin we włóknie dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z upraw w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019r.

Rys. 35. Wyniki badań procentowej zawartości lignin we włóknie dla odmian Artemida, Modran oraz Sara wzrastających w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2020r.

Rys. 36. Wyniki badań procentowej zawartości lignin we włóknie dla odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z upraw w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2021r.

Rys. 37. Wpływ odmiany Inu i poziomu wilgotności na zawartość lignin we włóknie – efekt interakcji

Rys. 38. Widma FTIR-ATR włókien Inianych, odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z upraw w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019r.

Rys. 39. Widma FTIR-ATR włókien Inianych, odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z upraw w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2020r.

Rys. 40. Widma FTIR-ATR włókien Inianych, odmian Artemida, Modran oraz Sara pochodzących z upraw w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2021r.

Rys. 41. Wpływ odmiany Inu i stopnia wilgotności gleby na zawartość kwasu *p*-kumarowego we włóknie – efekt interakcji

Rys. 42. Wpływ odmiany Inu i poziomu wilgotności gleby na zawartość kwasu ferulowego we włóknie – efekt interakcji

Rys. 43. Wpływ stężenia próby na zdolność włókna do redukcji jonów żelaza dla odmiany Artemida hodowanej w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019r.

Rys. 44. Wpływ stężenia próby na zdolność włókna do redukcji jonów żelaza dla odmiany Modran hodowanej w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019r.

Rys. 45. Wpływ stężenia próby na zdolność włókna do redukcji jonów żelaza dla odmiany Sara hodowanej w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019r.

Rys. 46. Wpływ stężenia próby na zdolność włókna do redukcji jonów żelaza dla odmiany Artemida hodowanej w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2020r.

Rys. 47. Wpływ stężenia próby na zdolność włókna do redukcji jonów żelaza dla odmiany Modran hodowanej w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2020r.

Rys. 48. Wpływ stężenia próby na zdolność włókna do redukcji jonów żelaza dla odmiany Sara hodowanej w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2020r.

Rys. 49. Wpływ stężenia próby na zdolność włókna do redukcji jonów żelaza dla odmiany Artemida hodowanej w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2021r.

Rys. 50. Wpływ stężenia próby na zdolność włókna do redukcji jonów żelaza dla odmiany Modran hodowanej w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2021r.

Rys. 51. Wpływ stężenia próby na zdolność włókna do redukcji jonów żelaza dla odmiany Sara hodowanej w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2021r.

Rys. 52. Zdolność włókien lnianych pochodzących z 2019r. do redukcji jonów żelaza dla stężenia próby wynoszącej 4 mg/ml

Rys. 53. Zdolność włókien lnianych pochodzących z 2020r. do redukcji jonów żelaza dla stężenia próby wynoszącej 4 mg/ml

Rys. 54. Zdolność włókien lnianych pochodzących z 2021r. do redukcji jonów żelaza dla stężenia próby wynoszącej 4 mg/ml

Rys. 55. Wpływ stężenia próby na zdolność wychwytywania modelowego rodnika DPPH – ekstrakt z włókien lnianych odmiany Artemida pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019r.

Rys. 56. Wpływ stężenia próby na zdolność wychwytywania modelowego rodnika DPPH - ekstrakt z włókien lnianych odmiany Modran pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019r.

Rys. 57. Wpływ stężenia próby na zdolność wychwytywania modelowego rodnika DPPH - ekstrakt z włókien lnianych odmiany Sara pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019r.

Rys. 58. Wpływ stężenia próby na zdolność wychwytywania modelowego rodnika DPPH - ekstrakt z włókien lnianych odmiany Artemida pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2020r.

Rys. 59. Wpływ stężenia próby na zdolność wychwytywania modelowego rodnika DPPH - ekstrakt z włókien lnianych odmiany Modran pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2020r.

Rys. 60. Wpływ stężenia próby na zdolność wychwytywania modelowego rodnika DPPH - ekstrakt z włókien lnianych odmiany Sara pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2020r.

Rys. 61. Wpływ stężenia próby na zdolność wychwytywania modelowego rodnika DPPH - ekstrakt z włókien lnianych odmiany Artemida pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2021r.

Rys. 62. Wpływ stężenia próby na zdolność wychwytywania modelowego rodnika DPPH - ekstrakt z włókien lnianych odmiany Modran pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2021r.

Rys. 63. Wpływ stężenia próby na zdolność wychwytywania modelowego rodnika DPPH - ekstrakt z włókien lnianych odmiany Sara pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2021r.

Rys. 64. Wymagane stężenie substancji zawierającej przeciwutleniacz do usunięcia 50% początkowych rodników DPPH dla prób z 2019r.

Rys. 65. Wymagane stężenie substancji zawierającej przeciwutleniacz do usunięcia 50% początkowych rodników DPPH dla prób z 2020r.

Rys. 66. Wymagane stężenie substancji zawierającej przeciwutleniacz do usunięcia 50% początkowych rodników DPPH dla prób z 2021r.

Rys. 67. Dyfraktogram WAXD włókien lnu odmiany Artemida pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019, 2020 oraz 2021r.

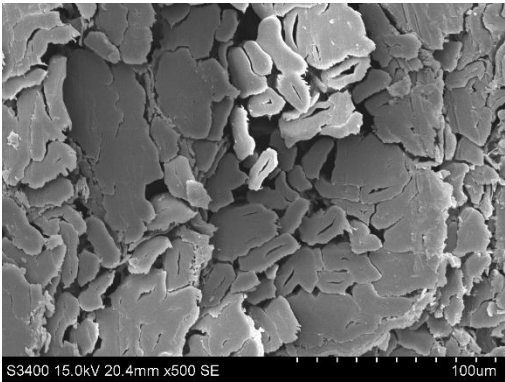
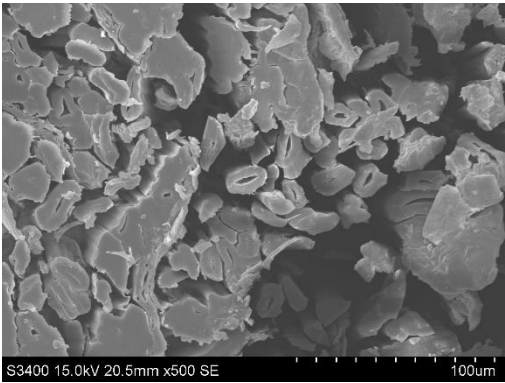
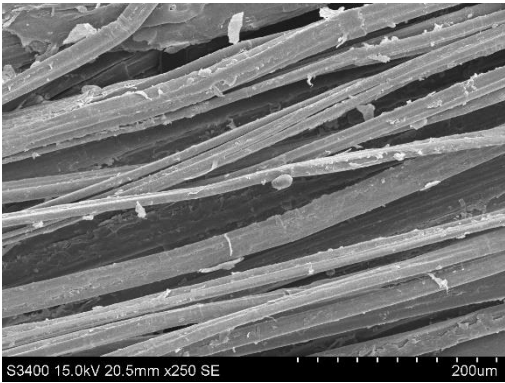
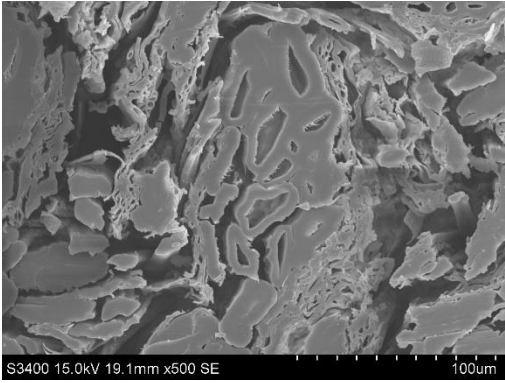
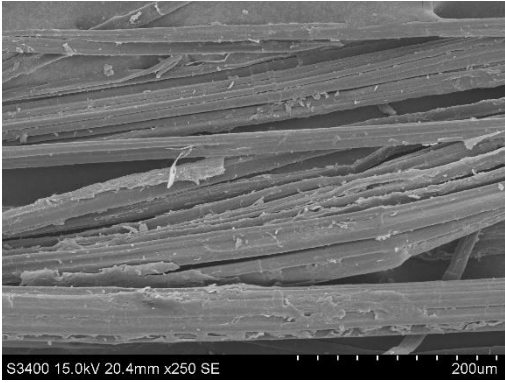
Rys. 68. Dyfraktogram WAXD włókien Inu odmiany Modran pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019, 2020 oraz 2021r.

Rys. 69. Dyfraktogram WAXD włókien Inu odmiany Sara pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019, 2020 oraz 2021r.

Rys. 70. Stopień krystaliczności włókien Inianych pochodzących z hodowli w warunkach kontroli oraz stresu suszy z 2019, 2020 oraz 2021r.

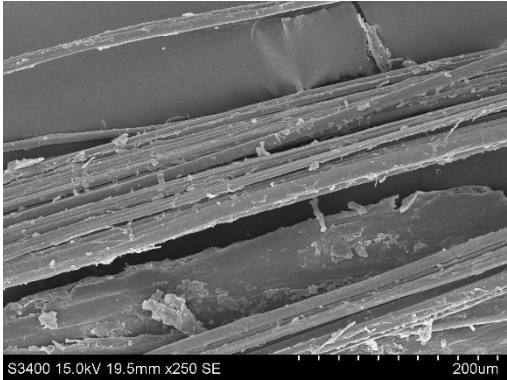
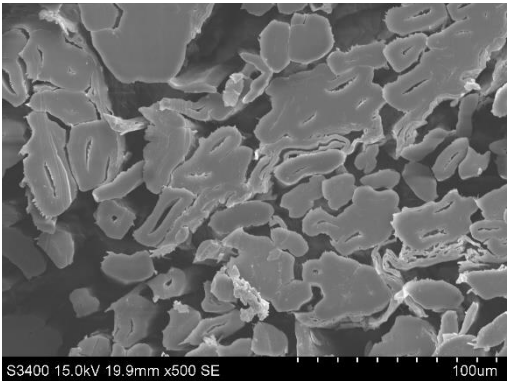
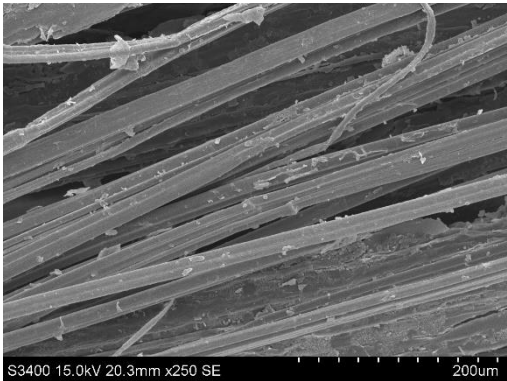
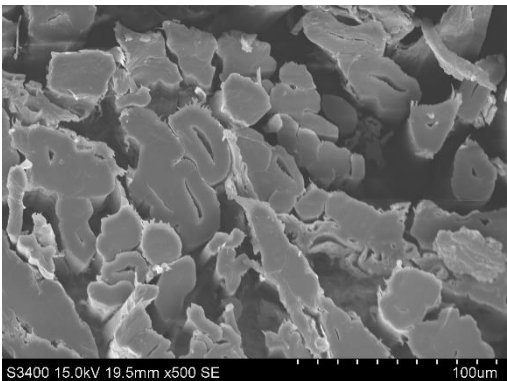
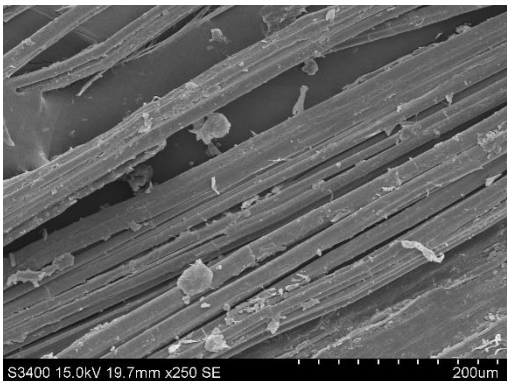
Załącznik 1

Tabela 32. Obrazy mikroskopowe SEM przekrojów poprzecznych i widoków wzdłużnych włókien Inu, odmiany Artemida z 2019r.

Artemida 2019r.		
Symbol	Przekrój poprzeczny	Widok wzdłużny
A25		
A35		
A45		

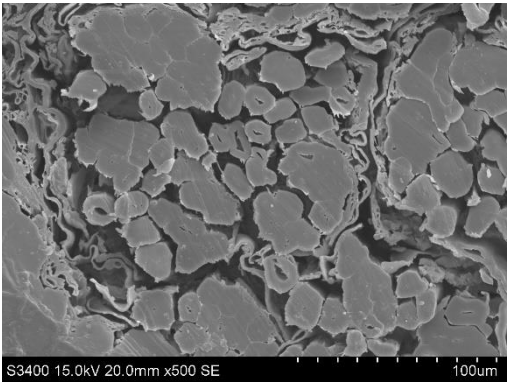
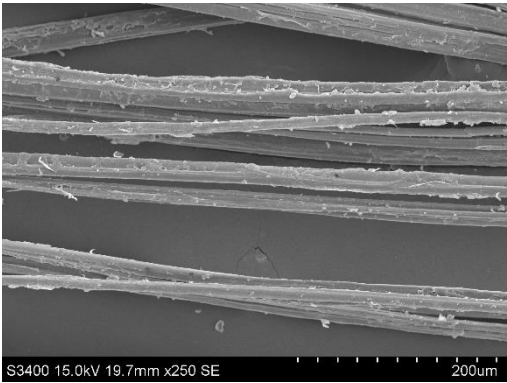
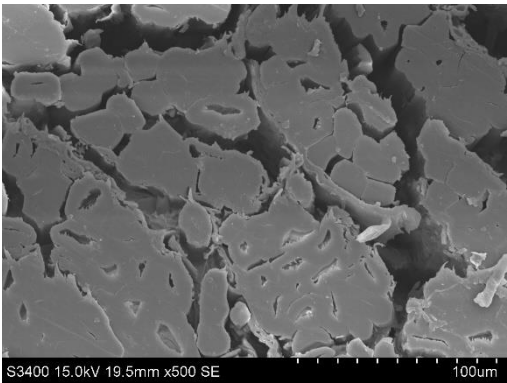
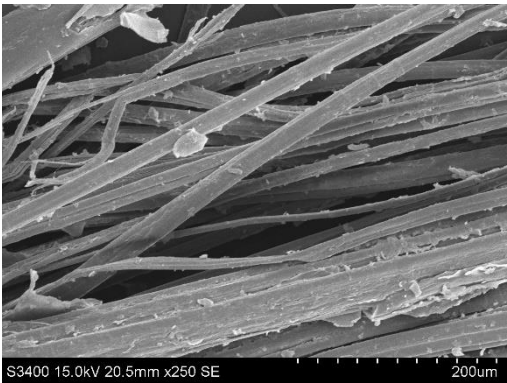
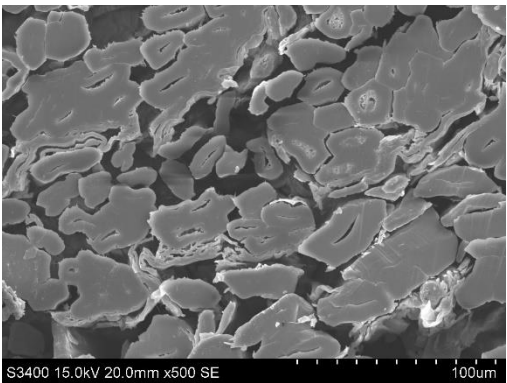
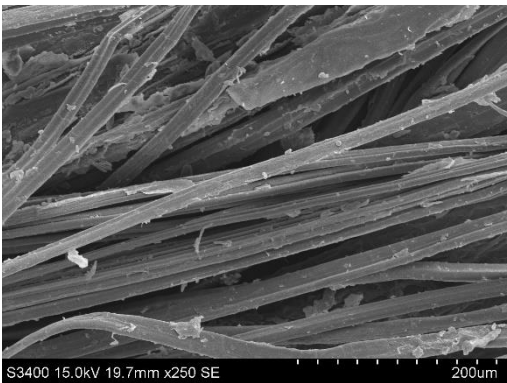
Źródło: opracowanie własne

Tabela 33. Obrazy mikroskopowe SEM przekrojów poprzecznych i widoków wzdłużnych włókien Inu, odmiany Modran z 2019r.

Modran 2019r.		
Symbol	Przekrój poprzeczny	Widok wzdłużny
M25		
M35		
M45		

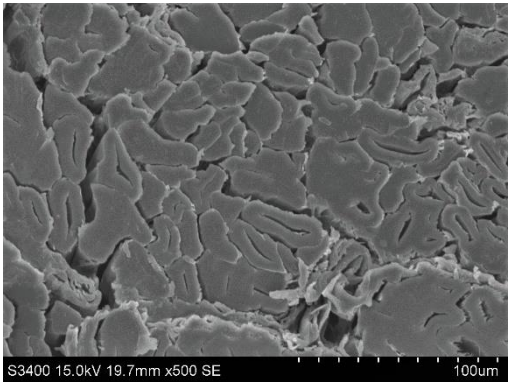
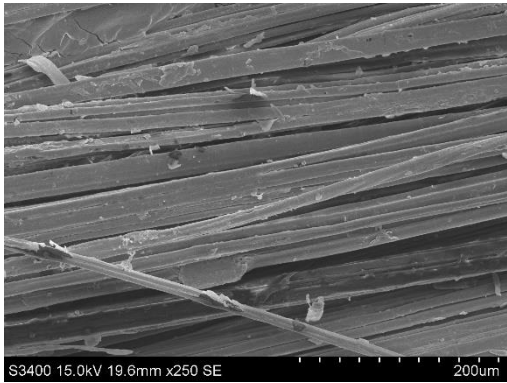
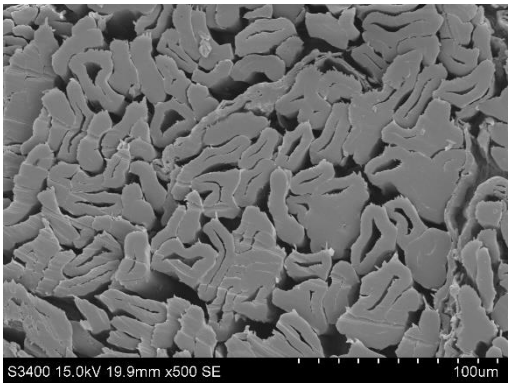
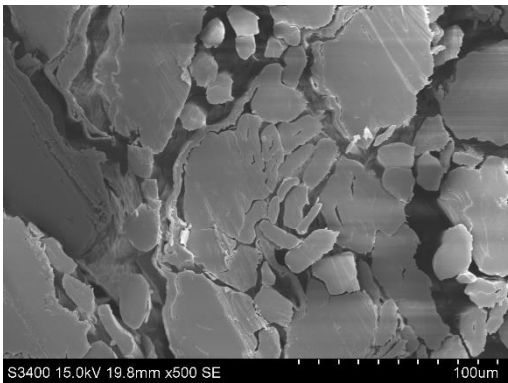
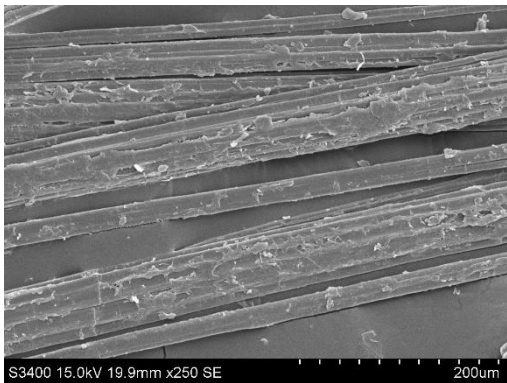
Zródło: opracowanie własne

Tabela 34. Obrazy mikroskopowe SEM przekrojów poprzecznych i widoków wzdłużnych włókien Inu, odmiany Sara z 2019r.

Sara 2019r.		
Symbol	Przekrój poprzeczny	Widok wzdłużny
S25		
S35		
S45		

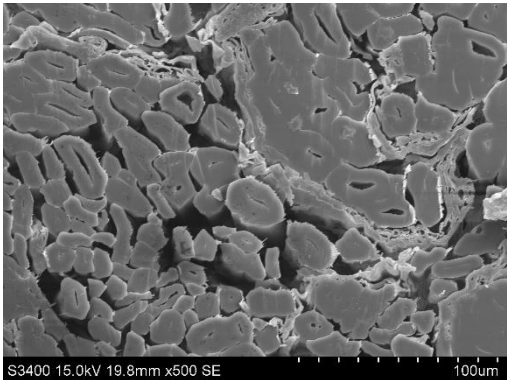
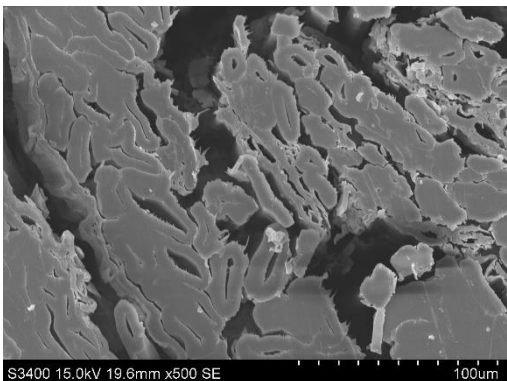
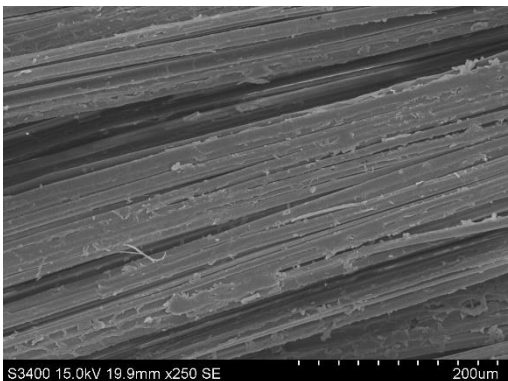
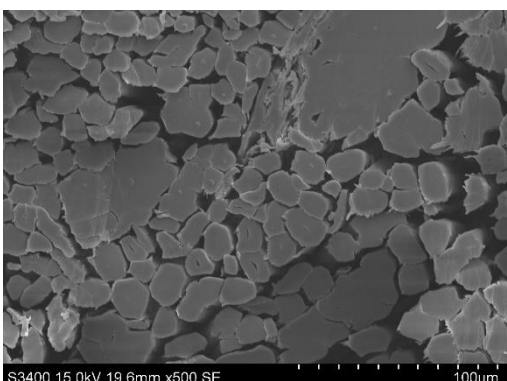
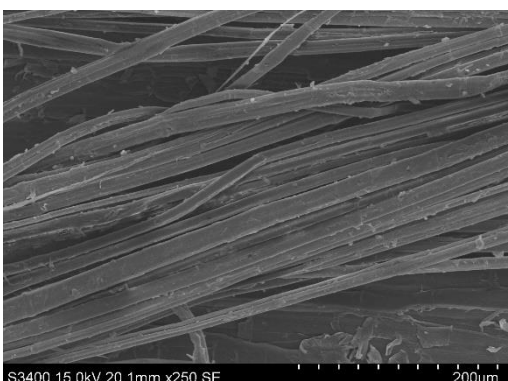
Źródło: opracowanie własne

Tabela 35. Obrazy mikroskopowe SEM przekrojów poprzecznych i widoków wzdłużnych włókien Inu, odmiany Artemida z 2020r.

Artemida 2020r.		
Symbol	Przekrój poprzeczny	Widok wzdłużny
A25		
A35		
A45		

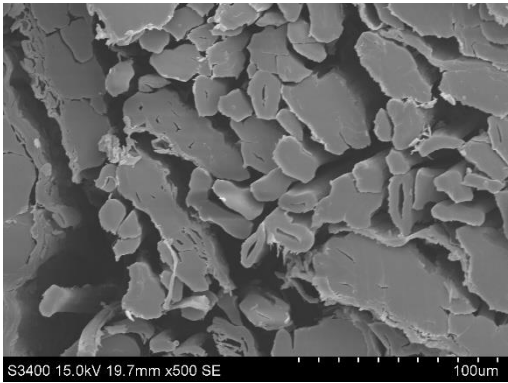
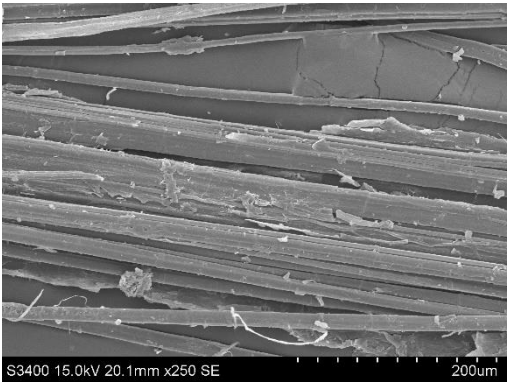
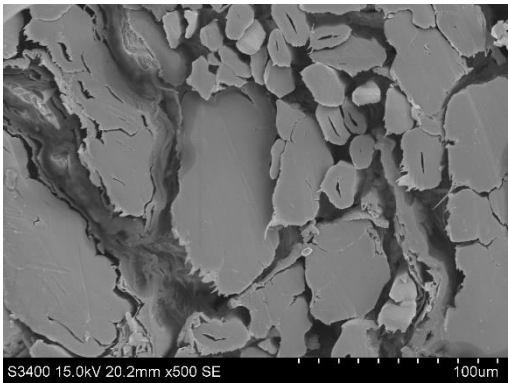
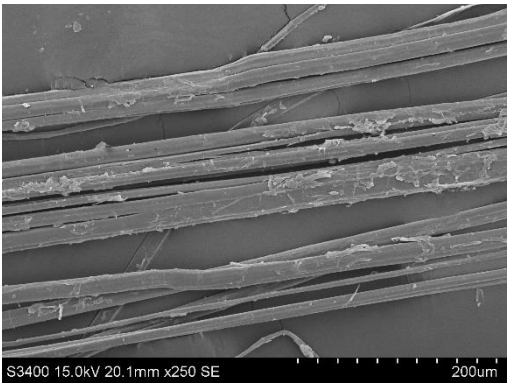
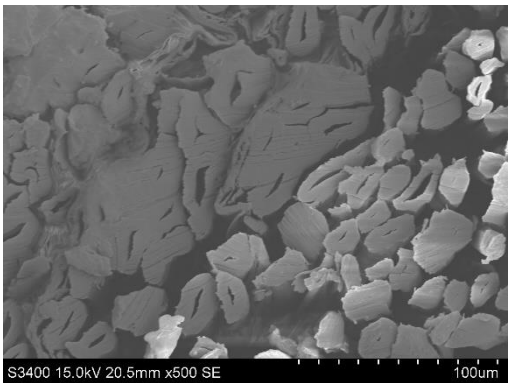
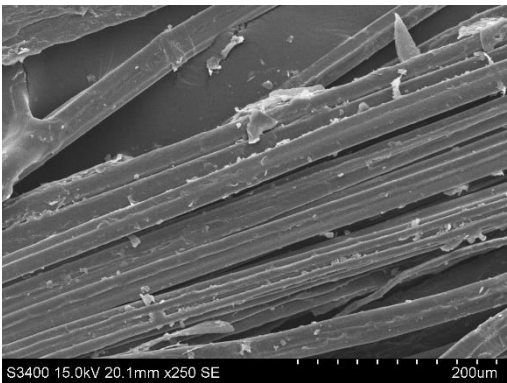
Źródło: opracowanie własne

Tabela 36. Obrazy mikroskopowe SEM przekrojów poprzecznych i widoków wzdłużnych włókien Inu, odmiany Modran z 2020r.

Modran 2020r.		
Symbol	Przekrój poprzeczny	Widok wzdłużny
M25		
M35		
M45		

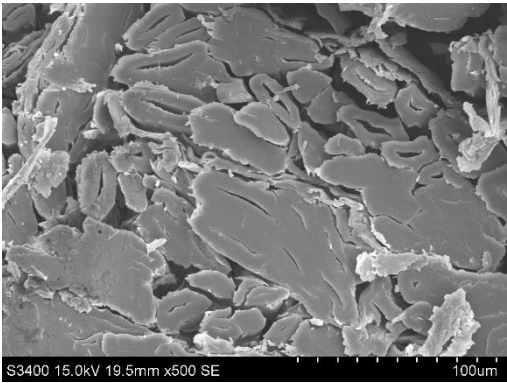
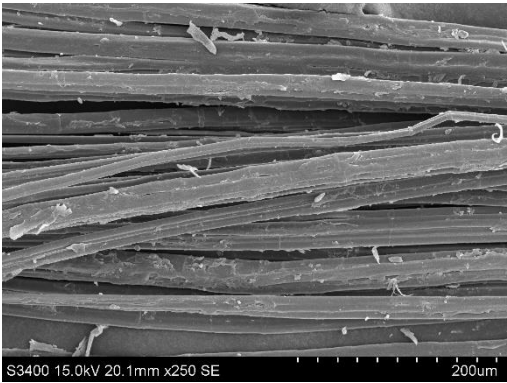
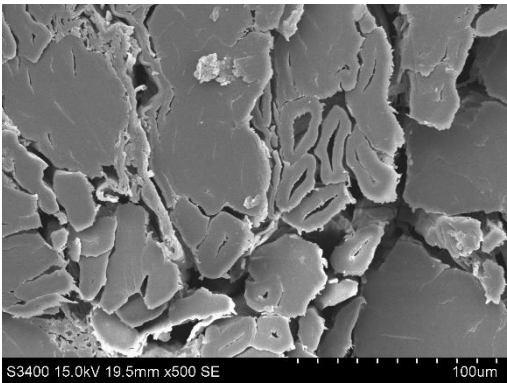
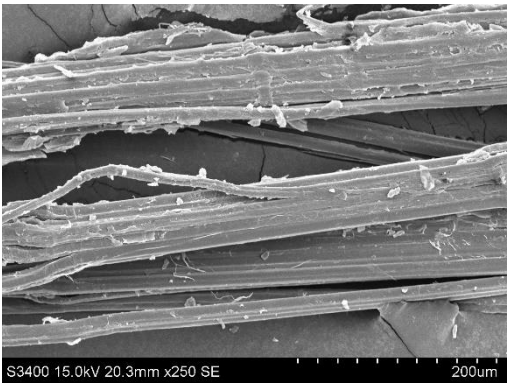
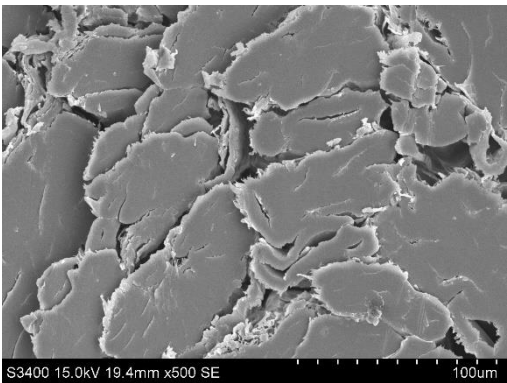
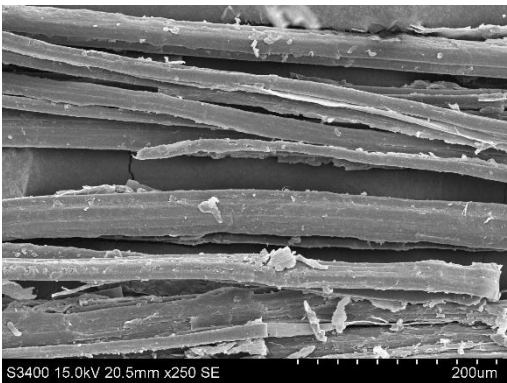
Źródło: opracowanie własne

Tabela 37. Obrazy mikroskopowe SEM przekrojów poprzecznych i widoków wzdłużnych włókien Inu, odmiany Sara z 2020r.

Sara 2020r.		
Symbol	Przekrój poprzeczny	Widok wzdłużny
S25		
S35		
S45		

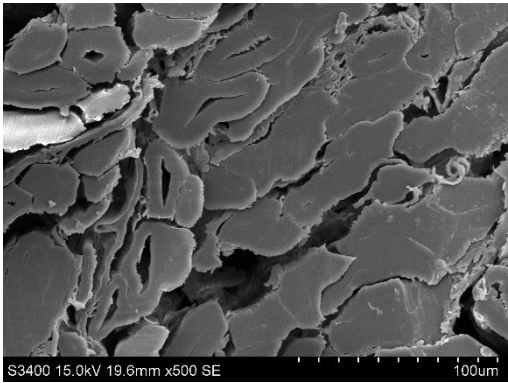
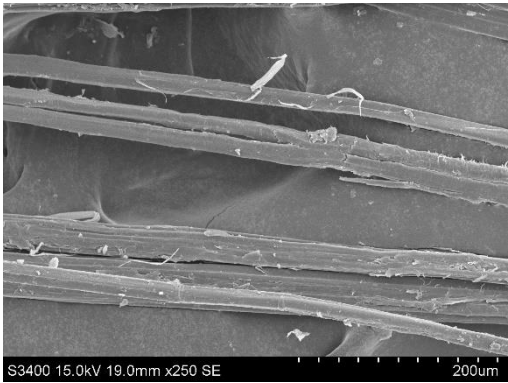
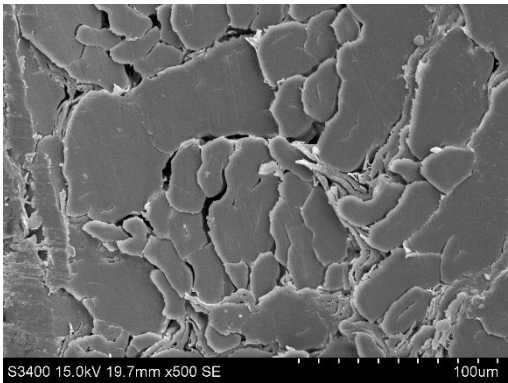
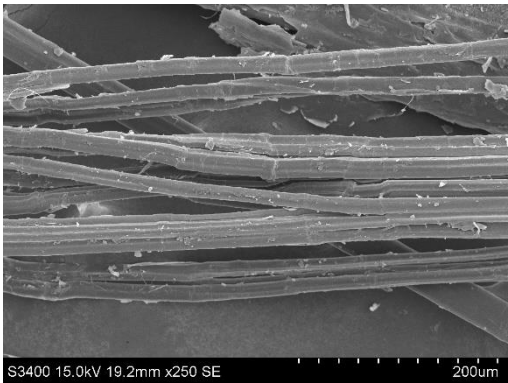
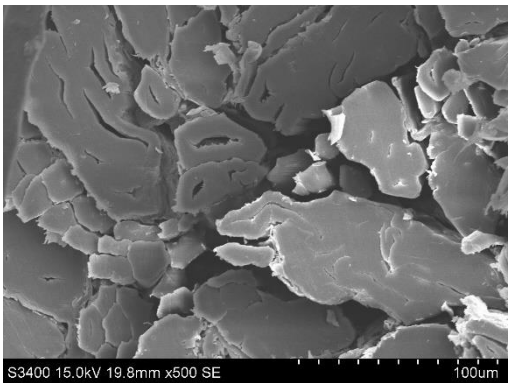
Źródło: opracowanie własne

Tabela 38. Obrazy mikroskopowe SEM przekrojów poprzecznych i widoków wzdłużnych włókien Inu, odmiany Artemida z 2021r.

Artemida 2021r.		
Symbol	Przekrój poprzeczny	Widok wzdłużny
A25		
A35		
A45		

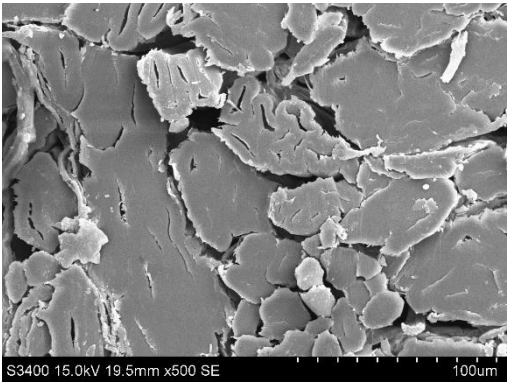
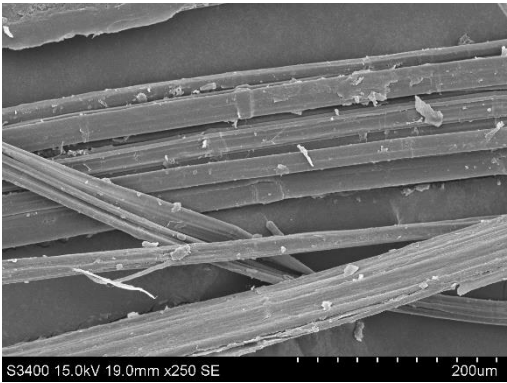
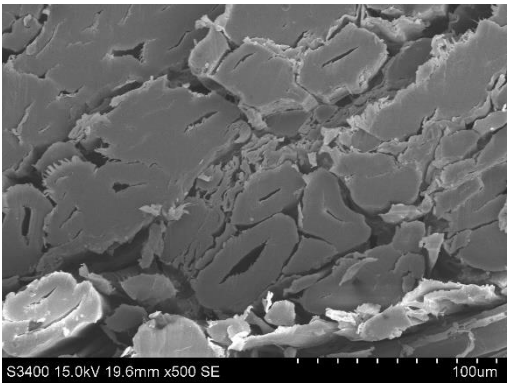
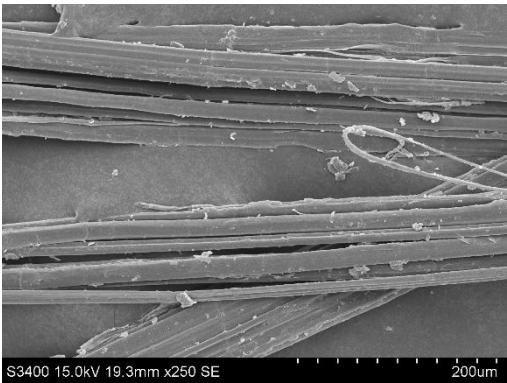
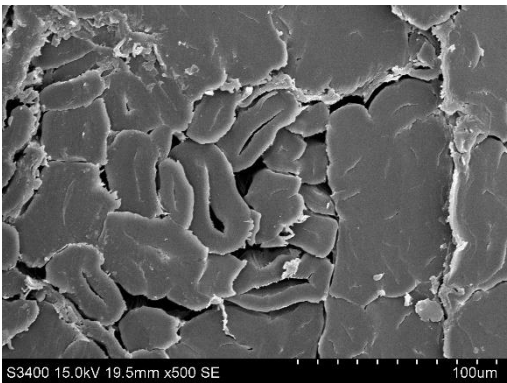
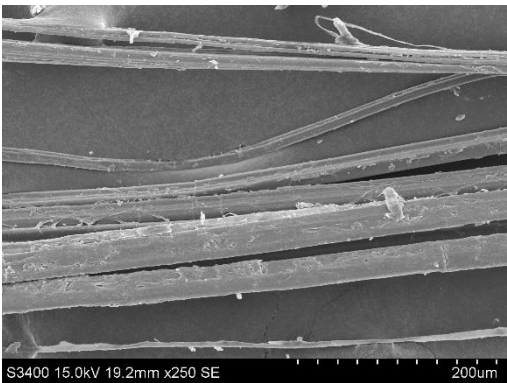
Źródło: opracowanie własne

Tabela 39. Obrazy mikroskopowe SEM przekrojów poprzecznych i widoków wzdłużnych włókien Inu, odmiany Modran z 2021r.

Modran 2021r.		
Symbol	Przekrój poprzeczny	Widok wzdłużny
M25		
M35		
M45		

Źródło: opracowanie własne

Tabela 40. Obrazy mikroskopowe SEM przekrojów poprzecznych i widoków wzdłużnych włókien Inu, odmiany Sara z 2021r.

Sara 2021r.		
Symbol	Przekrój poprzeczny	Widok wzdłużny
S25		
S35		
S45		

Źródło: opracowanie własne