

WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE MIĄŻSZU WARZYW RZEPOWATYCH

Jerzy Bohdziewicz

Instytut Inżynierii Rolniczej, Akademia Rolnicza, ul. Chełmońskiego 37/41, 51-630 Wrocław
e-mail: bohdziewicz@imr.ar.wroc.pl

Streszczenie. Przedstawiono wyniki obliczeń naprężenia doraźnego σ_{\max} oraz umownego modułu sprężystości E_C , wyznaczonych na podstawie przebiegu σ - ε podczas testu ściskania i histerezy, dla trzech prędkości przesuwu głowicy pomiarowej. Badano próbki miąższu rzodkwi i rzodkiewki o różnej gęstości i zawartości suchej substancji. Stwierdzono znaczny rozrzut wyznaczonych właściwości mechanicznych. Na podstawie testów reologicznych ustalono, że struktura szkieletowa tkanki rzodkwi charakteryzuje się większą zdolnością kumulacji energii sprężystej oraz większym oporem mechanicznym niż tkanka rzodkiewki.

Słowa kluczowe: warzywa rzepowate, wytrzymałość, sprężystość, lepkość

WSTĘP

Krótki okres wegetacji, duże wymagania wodne oraz wrażliwość na warunki przechowywania jadalnych zgrubień warzyw rzepowatych (*Raphanus sativus*), mają istotny wpływ na zmiany właściwości fizycznych i chemicznych miąższu, te zaś determinują przebiegi procesów technologicznych. Cechą wyróżniającą tę grupę roślin jest występowanie zjawiska drewnienia tkanki, jako skutek zbyt małej ilości opadów przy wysokiej temperaturze otoczenia. Taka gąbczastość miąższu („sparcenie”) objawia się zmniejszeniem jego gęstości, pogarszają się walory smakowe, przez co obniża się jej przydatność konsumpcyjna [10].

Do pełnego scharakteryzowania tkanki roślinnej, jako materiału do dalszej obróbki, konieczne jest wyznaczenie jego właściwości mechanicznych i reologicznych, z uwzględnieniem innych cech fizycznych. Marginalne znaczenie gospodarcze warzyw rzepowatych [11,12], jest przyczyną niewielkiego zainteresowania, odnośnie badań właściwości mechanicznych tkanek. Pierwsze próby wyznaczenia współczynnika sprężystości miąższu rzodkwi i rzodkiewki, podjęto w latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia. Zastosowano metodę penetracyjną

[4,8], test ściskania próbek walcowych [3,9], oraz metodę dynamiczną [2]. Jako czynniki determinujące zachowanie się materiału pod wpływem obciążenia, przyjęto zawartość wody [8], ilość komórek przypadających na jednostkę długości oraz zawartość włókna w tkance [3,4].

Nie określono jednak korelacji, pomiędzy gęstością materiału a sprężystością i lepkością, wyznaczonymi podczas testów reologicznych. Może mieć to istotne znaczenie w odniesieniu do tkanki roślinnej, w której występują obszary nieciągłości struktury wywołane procesami fizjologicznymi, zachodzącymi podczas wzrastania rośliny [13] oraz na skutek ubytku wody podczas przechowywania plonów.

Celem pracy było wyznaczenie właściwości mechanicznych w postaci naprężenia doraźnego σ_{\max} oraz umownego modułu sprężystości E_C tkanki miąższu rzodkiewki i rzodkiewki, podczas próby wytrzymałościowej i w warunkach cyklicznego obciążania. Określano także właściwości lepkosprężyste badanego materiału, jako odpowiedź na zadane warunki realizacji testów relaksacji i pełzania. Wykorzystano metodykę, stosowaną przez autora do badań warzyw korzeniowych [5,6,7].

Naprężenie σ_{\max} odpowiada maksymalnej wartości siły podczas ściskania próbki, moduł E_C wyznaczony na podstawie obliczeń energii pochłoniętej przez próbkę, charakteryzuje zależność pomiędzy naprężeniem i odkształceniem [5].

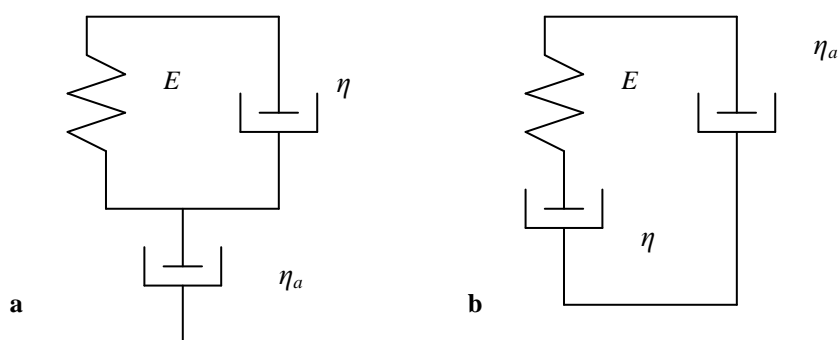
MATERIAŁ I METODY

Obiektem badań były zgrubienia jadalne rzodkiewki odmiany Sopol Lodu i rzodkiewki Murzynka. Wyznaczano gęstość badanego materiału oraz zawartość suchej substancji w stosunku do masy całkowitej materiału, stosowano standardową metodę suszarkowo-wagową. Do badań wycinano próbki walcowe, o średnicy 17,6 mm i wysokości 20 ± 2 mm (mierzonej dla każdej próbki).

Testy realizowano na maszynie wytrzymałościowej typu Instron 5566 z głowicą o zakresie do 1 kN. Przy ściskaniu osiowym prędkość przemieszczenia ustalono na poziomie 1, 10 oraz 100 mm·min⁻¹.

Badania realizowano w przeciągu 9 dni, począwszy od daty zbioru. Jednocześnie pobierano po trzy próbki z dziesięciu sztuk do wyznaczenia wartości F_{\max} (charakteryzującej wytrzymałość biologiczną materiału) oraz dalsze trzy próbki do realizacji testu histerezy odkształceń, relaksacji naprężeń i pełzania, przy obciążeniu na poziomie 50% F_{\max} i prędkości przemieszczenia głowicy równej 1 mm·min⁻¹. Na podstawie uzyskanych wyników testu ściskania i histerezy odkształceń, obliczano umowny moduł E_C , jako umowny współczynnik sprężystości dla stanu, w którym energię właściwą u , wydatkowaną na odkształcenie próbki, potraktowano jako iloczyn zastępczego naprężenia i rzeczywistego odkształcenia $u = 0,5 \cdot \sigma \cdot \varepsilon = 0,5 \cdot E_C \cdot \varepsilon^2$.

Do opisu zachowania się materiału w zadanych warunkach przyjęto zredukowane modele Burgersa, których parametrami są sprężystość E , lepkość η oraz lepkość pozorna η_a .



Rys. 1. Połączenie modelu Kelvina-Voigta i cieczy Newtona (a) oraz modelu Maxwella i cieczy Newtona (b)

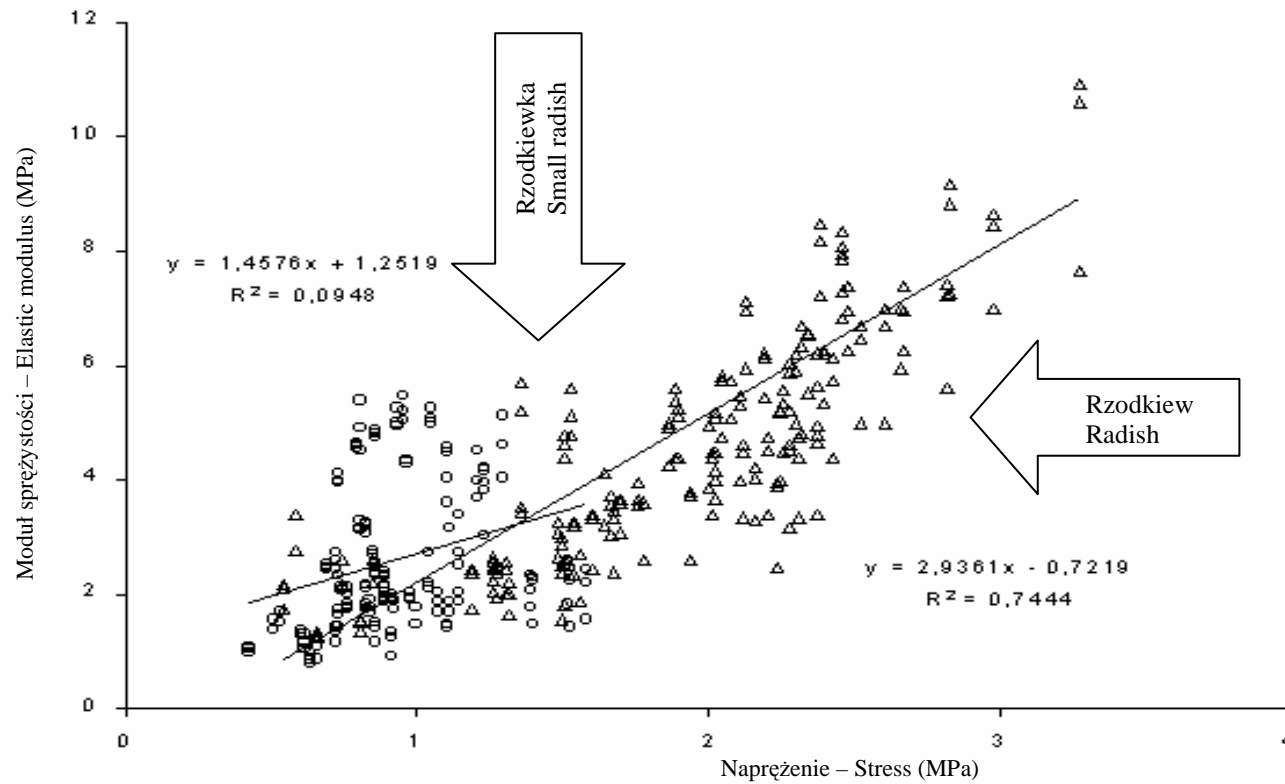
Fig. 1. Combination of the: Kelvin-Voigt model and Newton fluid (a), and of the Maxwell model and Newton fluid (b)

WYNIKI I DYSKUSJA

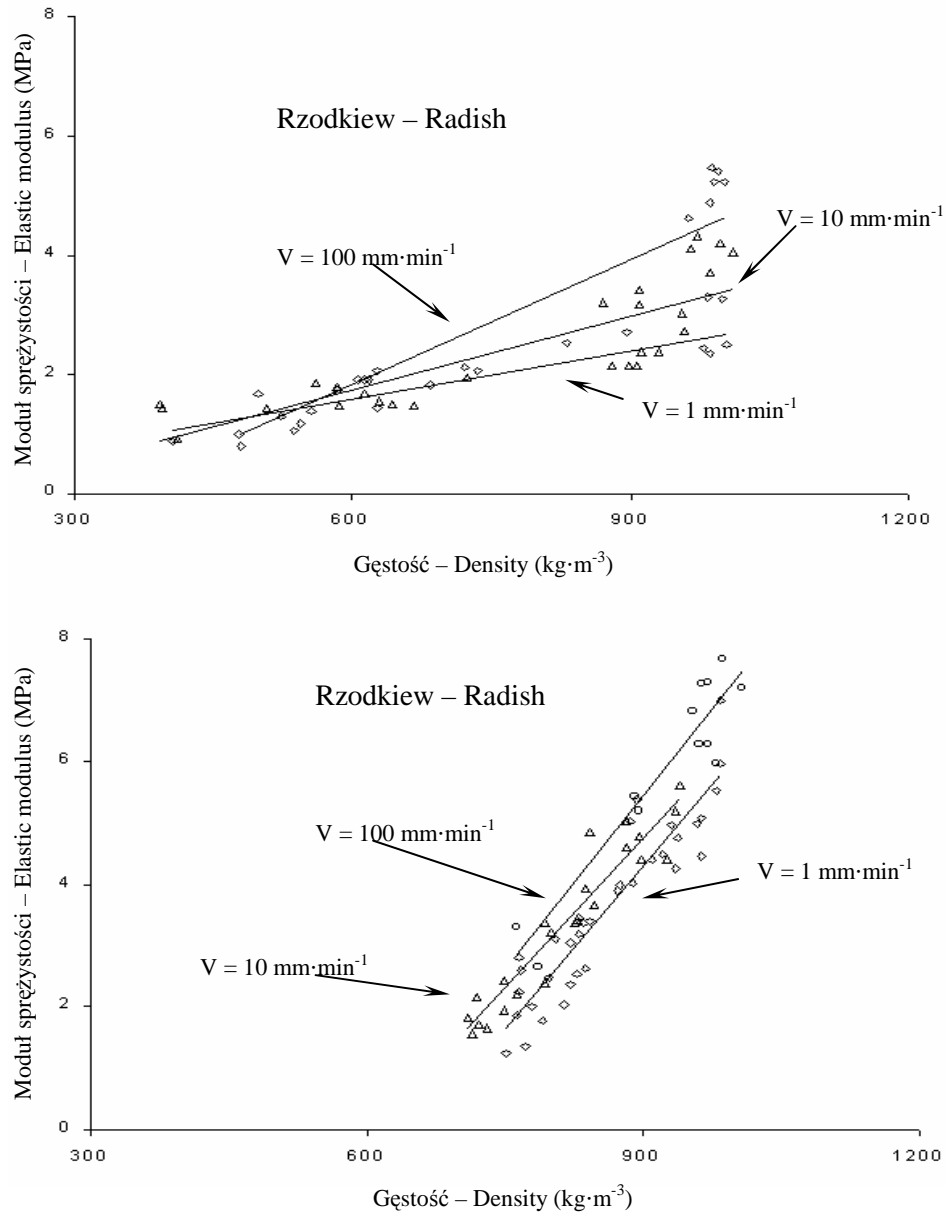
Wzajemną korelację, pomiędzy wynikami obliczeń umownego modułu E_C oraz naprężenia doraźnego σ_{max} , dla wszystkich powtórzeń testu ściskania, przedstawiono na rysunku 2. Gęstość próbek rzodkiewki zawierała się w przedziale od 392 do 1011 $kg \cdot m^{-3}$, zawartość suchej substancji od 4% do 8%. Analogicznie gęstość miąższu rzodkwi była w zakresie od 710 do 1094 $kg \cdot m^{-3}$, zawartość suchej substancji od 7% do 15%.

Zależność, pomiędzy gęstością badanego materiału a obliczoną wartością modułu E_C , przedstawiono na rysunku 3; uwzględniono zmianę prędkości przesuwu głowicy pomiarowej. Można tu zauważyć analogię do osiągnięć innych badaczy. Blahovec i in. [2,3,4] zestawili moduł sprężystości (wyznaczony metodą siecznej) z ilością komórek, przypadającą na jednostkową powierzchnię przekroju, oraz z masą wypreparowanego chemicznie włókna (celulozy). W odniesieniu do próbek rzodkwi zależności te opisali równaniem prostej, jednocześnie stwierdzili konieczność przyjęcia funkcji nieliniowych dla analogicznych zależności dotyczących tkanki rzodkiewki, upatrując przyczynę w odmiennym mechanizmie uszkodzania struktury podczas eksperymentu.

Jak można zauważyć na rysunku 3 wzrost prędkości przesuwu głowicy skutkuje przyrostem wartości umownego modułu E_C , w odniesieniu do materiału świeżego. Zależność ta nie dotyczy próbek o zmniejszonej gęstości, co niewątpliwie ma związek ze zmianami zachodzącymi w badanym materiale podczas jego przechowywania.

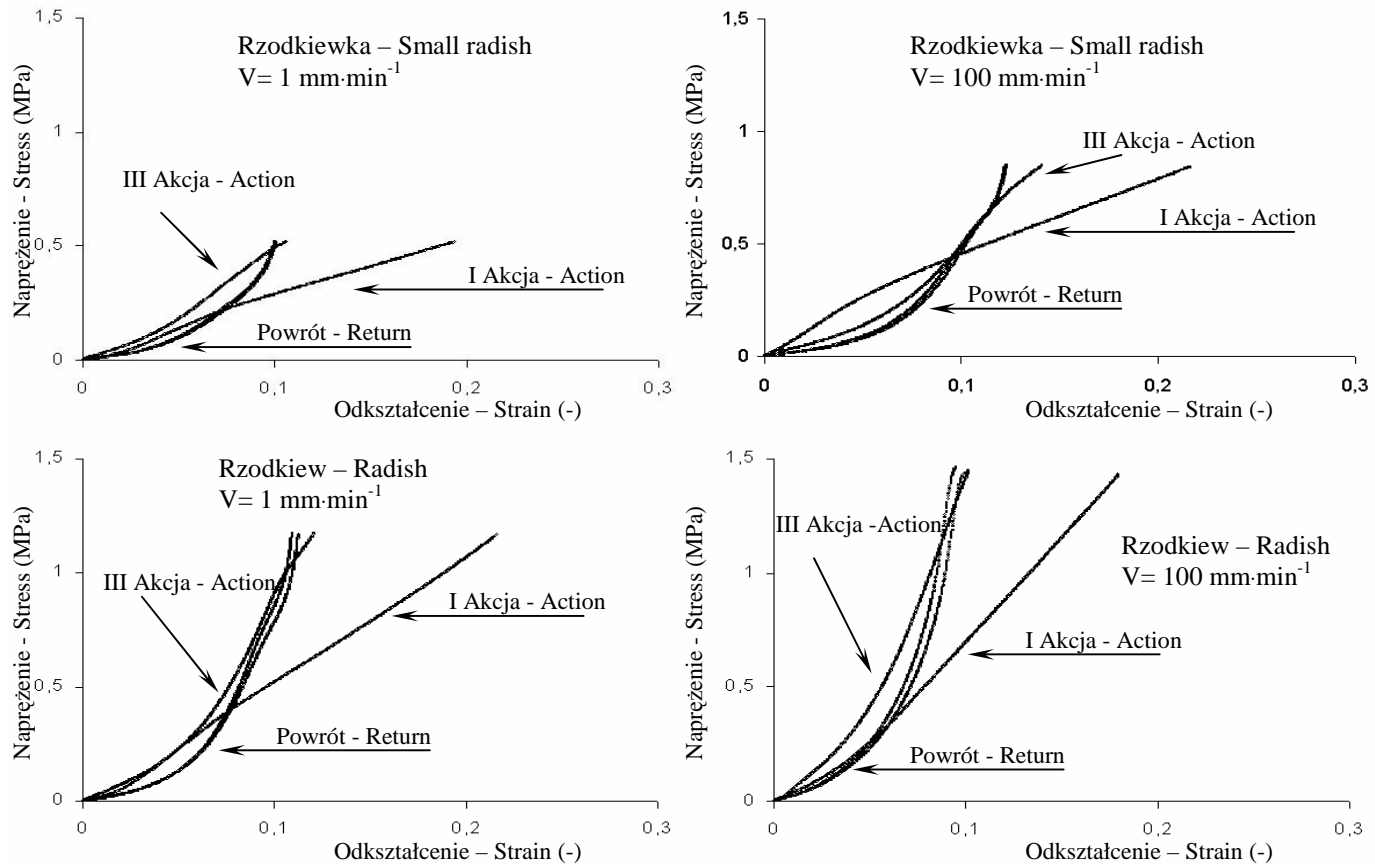


Rys. 2. Wpływ napężenia doraźnego σ_{max} na wartość umownego modułu sprężystości E_C tkanki warzyw rzepowatych
Fig. 2. The breaking stress σ_{max} effect on conventional elastic modulus E_C level in radish and small radish tissues



Rys. 3. Zależności pomiędzy umownym modulem sprężystości E_C a gęstością tkanki mięszu, dla trzech różnych prędkości przemieszczenia głowicy pomiarowej

Fig. 3. The conventional modulus E_C versus flesh density, with three different working speeds of measuring head



Rys. 4. Zależności naprężenie-odkształcenie dla przebiegu pierwszej i trzeciej pętli histerezy

Fig. 4. The stress-strain relations in the course of the first and third hysteresis loops

Właściwości sprężyste struktury szkieletowej miąższu warzyw rzepowatych można wyznaczyć na podstawie testu histerezy. Zestawienie wyników obliczeń średnich wartości modułu E_C dla przebiegu pierwszej i trzeciej pętli histerezy, zamieszczono w tabeli 1. Dla porównania przedstawiono także wartości modułów obliczanych metodą siecznej (E_S) i stycznej (E_T). Przykładowe przebiegi σ - ε dla tkanki rzodkiewki i rzodkwi pokazano na rysunku 4.

Tabela 1. Zestawienie średnich wartości umownego modułu sprężystości E_C oraz modułów E_S , E_T dla przebiegu pierwszej i trzeciej pętli histerezy

Table 1. Mean values of conventional elastic modulus E_C and moduli E_S , E_T for the course of the first and third hysteresis loop

Materiał Material	Przebieg Course	$V = 1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$			$V = 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$		
		E_C (MPa)	E_S (MPa)	E_T (MPa)	E_C (MPa)	E_S (MPa)	E_T (MPa)
Rzodkiewka Small radish	I akcja Action 1	2,28±0,33	2,19±0,33	2,23±0,39	5,17±0,54	4,97±0,56	5,14±0,61
	I powrót Return 1	2,05±0,60	3,83±0,84	4,25±0,88	5,59±0,73	7,90±0,72	8,36±0,69
	III akcja Action 3	3,20±0,73	3,67±0,78	3,94±0,83	6,37±0,75	7,47±0,86	7,78±0,81
	III powrót Return 3	2,06±0,56	3,92±0,80	4,37±0,82	5,48±0,79	7,96±0,81	8,41±0,77
Rzodkiew Radish	I akcja Action 1	4,17±0,43	4,39±0,49	4,50±0,68	6,92±0,44	7,67±0,45	8,09±0,45
	I powrót Return 1	4,11±0,36	8,29±1,39	10,4±2,45	7,82±0,35	13,9±0,48	13,3±0,62
	III akcja Action 3	6,57±0,36	8,03±0,81	9,22±1,17	10,5±0,82	14,1±1,52	14,3±2,02
	III powrót Return 3	4,37±0,31	8,94±1,06	11,2±2,34	8,02±0,62	15,9±1,69	11,8±1,93

Zakres zmienności wartości średniej dla 25 powtórzeń obliczono na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Variability of mean value for 25 measurements calculated with significance level $\alpha = 0.05$.

Jak można odczytać z tabeli 1 wartości modułów E_C , E_S i E_T mają prawie jednakowe wartości w początkowej fazie testu histerezy, co świadczy o przebiegu krzywej σ - ε zbliżonym do linii prostej, czyli o objętościowym charakterze odkształcenia badanych próbek. Ponieważ ustalano obciążenie końcowe każdej próbki na poziomie 50% F_{\max} , odpowiada to stanowi, w którym zachodzi zjawisko filtracji i konsolidacji materiału kosztem efuzji gazów i cieczy, z jednoczesną dyssypacją energii kumulowanej w strukturze szkieletowej. Rozbieżności wartości modułu E_C w stosunku do E_S i E_T , obserwowane w pozostałych fazach realizacji testu, świadczą o esowatym kształcie przebiegu σ - ε , wynikającym ze stanu przejściowego pomiędzy występowaniem jedynie oporu sprężystego układu ścianki komórkowe-cytoplazma a sumarycznym oporem związanym z modyfi-

kowaniem struktury tkanki mięszu podczas ściskania próbki [1]. Pozorne umocnienie materiału, wynikające ze stosunku wartości modułów na początku pierwszej i trzeciej pętli histerezy, jest skutkiem przemieszczeń zachodzących w strukturach tkankowych mięszu, polegających m.in. na wypełnieniu pustych przestrzeni międzykomórkowych. Jak można zauważyć, kolejne cykle histerezy w niewielkim stopniu wpływają na właściwości sprężyste szkieletu, o czym świadczą zbliżone wartości modułu E_C w fazach sprężystego nawrotu.

Zdolność kumulacji energii sprężystej w tkance mięszu można także analizować na podstawie testu relaksacji naprężeń. W tabeli 2 przedstawiono wyniki sekwencyjnych obliczeń parametrów przyjętego modelu (rysunek 1b) w postaci modułu sprężystości E oraz współczynników lepkości η i η_a , dla próbek materiału o gęstości około $950 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Tabela 2. Zestawienie wyników obliczeń parametrów modelu reologicznego, test relaksacji w czasie 1750 sekund

Table 2. Results of calculation of rheological model parameters for 1750 seconds relaxation test time

Materiał Material	Czas Time (s)	Współczynnik Coefficient R^2	Sprężystość Elasticity E (MPa)	Lepkość Viscosity η (MPa·s)	Lepkość Viscosity η_a (GPa·s)
Rzodkiewka Small radish	250	0,994	0,49	6,4	7,3
	500	0,993	0,56	10,8	10,9
	750	0,992	0,60	14,4	13,4
	1000	0,993	0,63	17,7	15,1
	1250	0,994	0,65	20,4	16,2
	1500	0,994	0,66	22,8	16,9
	1750	0,995	0,68	25,1	17,5
Rzodkiew Radish	250	0,994	0,83	11,0	9,6
	500	0,992	0,94	17,4	15,6
	750	0,990	1,00	22,4	20,3
	1000	0,990	1,04	26,6	24,0
	1250	0,990	1,07	30,1	26,7
	1500	0,991	1,09	33,2	28,9
	1750	0,992	1,11	35,8	30,0

W tym przypadku wielkości E i η charakteryzują odpowiedź lepkosprężystą, charakterystyczną dla etapu przejściowego pomiędzy stanem quasi-statycznym, w którym energia jest dostarczana z zewnętrznego źródła (maszyna wytrzymałościowa) a stanem statycznym, w którym dominującą rolę odgrywa potencjał energetyczny, nagromadzony w strukturze szkieletowej tkanki roślinnej. Jako miarę oporu wewnętrznego materiału przyjęto współczynnik lepkości pozornej η_a , jego wartość zależy od zakumulowanej energii sprężystej oraz możliwości wzajem-

nego przemieszczania się (poślizgu) elementów struktury. Jak można zauważyć (tab. 2), występują różnice pomiędzy wartościami współczynnika η_a .

Dla porównania wielkości oporów ruchu elementów struktury tkanki miąższu obu warzyw, przemieszczających się pod wpływem obciążenia, przeprowadzono test pełzania. W tabeli 3 zestawiono wyniki sekwencyjnych obliczeń parametrów przyjętego modelu (rysunek 1a) w postaci modułu sprężystości E oraz współczynników lepkości η i η_a , próbek materiału pobranych ze zgrubień jadalnych, dla których wyniki testu relaksacji przedstawia tabela 2.

Tabela 3. Zestawienie wyników obliczeń parametrów modelu reologicznego, test pełzania w czasie 1750 sekund

Table 3. Results of calculation of rheological model parameters for 1750 seconds creep test time

Materiał Material	Czas Time (s)	Wskaźnik Coefficient R^2	Sprężystość Elasticity E (MPa)	Lepkość Viscosity η (GPa·s)	Lepkość Viscosity η_a (GPa·s)
Rzodkiewka Small radish	250	0,999	61	1,9	4,1
	500	0,998	45	2,5	6,6
	750	0,997	38	3,0	8,8
	1000	0,997	34	3,4	10,6
	1250	0,997	32	3,8	12,3
	1500	0,997	30	4,2	13,7
	1750	0,997	29	4,5	15,1
Rzodkiew Radish	250	0,999	80	2,8	6,8
	500	0,998	62	3,4	11,0
	750	0,998	55	4,0	14,7
	1000	0,997	50	4,6	18,3
	1250	0,997	47	5,1	21,7
	1500	0,996	44	5,6	24,7
	1750	0,996	43	6,0	27,6

Analogicznie, jak podczas testu relaksacji, wielkości E i η charakteryzują odpowiedź lepko-sprężystą, charakterystyczną dla etapu pełzania nieustalonego przy malejącej prędkości odkształcenia, przed okresem pełzania quasi-ustalonego, w którym prędkość ta ma wartość stałą. W obu tych etapach energia jest dostarczana z zewnętrznego źródła (maszyna wytrzymałościowa). Jako miarę oporu wewnętrznego materiału przyjęto współczynnik lepkości pozornej η_a . W tym przypadku, nieco większa wartość współczynnika η_a tkanki rzodkwi (tab. 3), świadczy o większych oporach ruchu niż w przypadku rzodkiewki. Można przypuszczać, że ma to związek z konstrukcją szkieletu tkankowego, gdyż w obu przypadkach materiał miał porównywalną gęstość i zawartość suchej substancji.

WNIOSKI

1. Cechy morfologiczne oraz warunki przechowywania zgrubień jadalnych, są przyczyną znacznego zróżnicowania gęstości tkanki mięszu rzodkwi i rzodkiewki, objawiającego się także rozrzutem wartości naprężenia doraźnego σ_{\max} oraz umownego modułu sprężystości E_C w badanych próbkach.

2. Tkanka rzodkwi, w porównaniu z rzodkiewką, posiada blisko dwukrotnie większą zdolność kumulacji energii sprężystej, szacowaną na podstawie modułu E_C w fazie sprężystego nawrotu podczas realizacji pętli histerezy.

3. Tkanka rzodkwi w porównaniu z rzodkiewką, charakteryzuje się blisko dwukrotnie większymi oporami ruchu, wyrażonymi wartością lepkości pozornej η_a w zadanych warunkach realizacji testów relaksacji i pełzania.

PIŚMIENNICTWO

1. **Blahovec J.:** Static mechanics and texture of fruits and vegetables. Res. Agr. Eng., 47(4), 144-169, 2001.
2. **Blahovec J.:** Resistance of potatoes and similar fleshy vegetable products to mechanical damage. Papers of the 3rd International Conference, Praha, 57- 64, 1985.
3. **Blahovec J., Patocka K., Mica B.:** Mechanicke a elektricke vlastnosti korenu a hliz v prubehu stlacovani. Zemědělska Technika, 30(6), 335-354, 1984.
4. **Blahovec J., Patocka K., Mica B.:** Mechanické vlastnosti dužnin zeleniny, Zemědělska Technika, 31(7), 393-410, 1985.
5. **Bohdziewicz J.:** Histereza odkształceń mięszu wybranych warzyw. Acta Agrophysica, 2(4), 707-716, 2003.
6. **Bohdziewicz J.:** Analiza procesu pełzania tkanki mięszu buraka ćwikłowego. Acta Agrophysica, 83, 21-31, 2003.
7. **Bohdziewicz J.:** Zmienność parametrów charakteryzujących zjawisko relaksacji naprężeń w tkance buraka ćwikłowego. Acta Agrophysica, 83, 33-44, 2003.
8. **Huyskens K.S., Schreiner M., Widell S.:** Qualitätssicherung bei Radies. TASPO Gartenbaumagazin, 7(2), 40-41, 1998.
9. **Kiesewetter R., Hellebrand J.:** Untersuchungen mechanischer Eigenschaften an Radieschen (*Raphanus sativus*) und Grünspargel (*Asparagus officinalis*). Tagungsbericht Akademie der Landwirtschaftswissenschaften DDR , 208, 187-192, 1982.
10. **Kołota E., Orłowski M., Osińska M.:** Warzywnictwo. Wyd. AR we Wrocławiu, 1994.
11. **Nieć H.:** Warzywa korzeniowe i rzepowate. PWRiL, Warszawa, 1984.
12. **Orłowski M., Kołota E.:** Uprawa warzyw. Wyd. „Brasika”, Szczecin, 1992.
13. **Villee C.A.:** Biologia. PWRiL Warszawa, 1990.

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF RADISH AND SMALL RADISH FLESH

Jerzy Bohdziewicz

Institute of Agricultural Engineering, Agricultural University
ul. Chelmońskiego 37/41, 51-630 Wrocław
e-mail: bohdziewicz@imr.ar.wroc.pl

Abstract. The paper presents calculations of breaking stress σ_{\max} and conventional elastic modulus E_C evaluated on the basis of the σ - ε course for three speeds of measuring head in compressive strength and hysteresis tests. The experiment involved samples of radish and small radish flesh of different density and dry substance content. A considerable scatter of the mechanical properties studied was observed. On the basis on rheological tests it was found that cellular structure of radish had a greater potential of elastic energy accumulation and greater mechanical resistance than small radish tissue.

Key words: strengths, elasticity, viscosity, radish and small radish