

POTENCJAŁ WODY W TKANKACH ROŚLINNYCH W OKRESIE PRZECHOWYWANIA *

K. Gołacki, B. Dobrzański, jr¹, R. Rybczyński¹

Zakład Teorii Maszyn i Automatyki AR, ul. Doświadczalna 50 A, 20-280 Lublin

¹Institut Agrofizyki PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

e-mail: bdob@demeter.ipan.lublin.pl

Streszczenie: Badania prowadzono na jabłkach odmian: Gloster, Jonagold, Idared oraz korzeniach marchwi odmiany Perfekcja, wyznaczając właściwości mechaniczne oraz potencjał wody po kolejnych miesiącach przechowywania. Zależności naprężenia i odkształcenia wyznaczono w zakresie prędkości deformacji: 1÷200 mm/min. Wytrzymałość mechaniczna jabłek i korzeni marchwi zależna od potencjału wody ich tkanki jest poprawnym wskaźnikiem jędrności plodów w okresie przechowywania oraz obrotu handlowego.

Słowa kluczowe: owoce, warzywa, tkanka, przechowywanie, potencjał wody

WSTĘP

Pojęcie potencjału chemicznego jest bardzo pomocne dla zrozumienia zasad ruchu wody i rozpuszczalnych substancji w układach biologicznych. Potencjał wody, analogicznie do potencjału chemicznego składnika w mieszaninie, definiowany jest jako zmiana potencjału termodynamicznego w określonym układzie i warunkach [Ślusarczyk i Kośmider, 24].

Baerdemeaker i in. [2], Murrase i Merva [20] oraz Gołacki [8,9] zaobserwowali, że potencjał wody okazał się przydatny jako kryterium oceny odporności tkanki na zniszczenie i trwałe odkształcenie. Cytowane prace potwierdzają silny

* Praca wykonana częściowo w ramach projektu badawczego Nr 5 P06F 006 19 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych

wpływ potencjału wody na wartości odkształceń krytycznych bulw ziemniaka, korzeni marchwi i jabłek [2,5,10-13,15,18].

Interesujące podejście do opisu procesu deformacji tkanek roślinnych zaprezentowali Murase i Merva [20]. Opisali oni dwa rodzaje procesów termodynamicznych zachodzących w tkankach podczas deformacji w których potencjał wody występuje jako zmienna stanu. Jest to proces izobaryczny, który zachodzi przy stałej wartości potencjału wody oraz proces izosteryczny, w którym praktycznie nie zmienia się proporcja między masą wody międzykomórkowej a masą nieporowatych tkanek [Murase i in. 21]. Zaprezentowana metoda jest próbą niefenomenologicznego opisu zjawiska deformacji tkanki roślinnej. Wydaje się jednak, że rozwiązanie teorii deformacji tkanki roślinnej o dużej zawartości wody, jest jeszcze dalekie.

Znane są z literatury próby wykorzystania potencjału wody do opisu procesu wymiany masy i ciepła, a w szczególności do opisu procesów termodynamicznych zachodzących w glebie [14,16,17,24] oraz opisu właściwości tkanki ziemniaka [1-7,15,22]. Jednocześnie wydaje się, że zbyt mało uwagi poświęca się związkom potencjału wody z właściwościami mechanicznymi i odpornością na uszkodzenia warzyw i owoców. Kontynuowanie badań nad określeniem tych związków może być przydatne do określenia optymalnych warunków zbioru, transportu i przechowywania.

POTENCJAŁ WODY W TKANCE ROŚLINNEJ

Potencjał wody w tkance roślinnej jest ściśle związany z ilością wody zawierającej substancje rozpuszczalne oraz ciśnieniem w komórkach. Potencjał wody w tkance roślinnej wyraża się sumą potencjałów odpowiadających ciśnieniu osmotycznemu soku komórkowego, sile ssącej pęczniejącego protoplastu i ścian komórkowych oraz turgorowi.

$$\psi = \psi_o + \psi_p + \psi_t \quad (1)$$

gdzie:

- ψ - całkowity potencjał wody w komórce,
- ψ_o - potencjał odpowiadający ciśnieniu osmotycznemu,
- ψ_p - potencjał odpowiadający sile ssącej pęczniejącego protoplastu,
- ψ_t - potencjał odpowiadający ciśnieniu turgorowemu.

Ślusarczyk i Kośmider [24] wskazują za Slayterem [23], że przy pewnych założeniach potencjał wody w roślinie można opisać zależnością:

$$\Delta\mu_w = \mu_w^w + \mu_w^z = V_w \Delta P + RT \Delta \ln a_w \quad (2)$$

gdzie:

- V_w - cząsteczkowa objętość wody,
- P - ciśnienie hydrostatyczne,
- R - stała gazowa,
- T - temperatura,
- a_w - aktywność wody,
- μ_w^w, μ_w^z - potencjał wodny wewnątrz i na zewnątrz komórki.

Występowanie przy opisie potencjału wody, turgoru a także ciśnienia hydrostatycznego daje teoretyczne podstawy do poszukiwania związków tego parametru z właściwościami mechanicznymi tkanek roślinnych jak sprężystość, lepkość i wytrzymałość krytyczna.

Całkowity potencjał wody w tkance roślinnej ma wartość ujemną i tylko w stanie pełnego turgoru, co jest praktycznie niemożliwe, może być równy zero. Potencjał pęczniejącego protoplastu i ścian komórkowych przy dużej zawartości wody w komórce jest mały i może być pominięty. Nilsson i in. [21] podali zależności między ciśnieniem turgorowym a modulem sprężystości tkanek, o postaci:

$$E = C \psi_i + B \quad (3)$$

gdzie: E - moduł Younga, B, C - stałe

Model Nilssona [21] został zweryfikowany eksperymentalnie przez Timbersa i in. [25] oraz Murrase i Merva [20] na próbkach ziemniaka. Na podstawie badań cytowanych wyżej autorów można stwierdzić, że potencjał osmotyczny w istotnym z praktycznego punktu widzenia zakresie wilgotności zmienia się nieznacznie i jego wartość można przyjąć jako stałą. Przekształcając wzór (1) i wstawiając do związku (3) otrzymujemy zależność:

$$E = C(\psi - \psi_o) + B = C\psi - C\psi_o + B = C\psi + D \quad (4)$$

gdzie: D - nowa stała

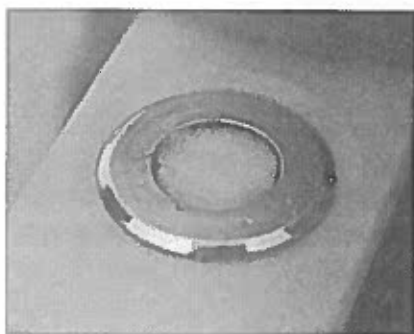
Istnieje zatem możliwość prostego powiązania całkowitego potencjału wody ze sprężystością tkanek roślinnych w określonym zakresie ich wilgotności.

Zawartość wody w materiale roślinnym jest bardzo istotnym czynnikiem warunkującym jego właściwości fizyczne i w związku z tym, musi być uwzględniona przy rozpatrywaniu zagadnień dotyczącego zbioru, przetwórstwa i przechowalności owoców. Jak pisze Murase i in. [19], koncepcja ogólnej zawartości wody została zwyczajowo przyjęta do opisu stanu wody w tkance roślinnej. Wydaje się jednak, że lepiej funkcję tę spełnia potencjał wody, który jest ściśle związany z ilością wody zawierającej substancje rozpuszczalne oraz ciśnieniem w komórkach podczas gdy ogólna zawartość wody nie uwzględnia tych zjawisk. Stwierdzenie tej zależności dla wszystkich badanych owoców może być potwierdzeniem prawdziwości kryterium odkształcenia krytycznego dla tkanek roślinnych o dużej zawartości wody.

Celem badań było wyznaczenie naprężeń i odkształceń krytycznych tkanki owoców rolnych o podobnym stopniu uwodnienia, jednak o zróżnicowanej wytrzymałości mechanicznej; jaka występuje pomiędzy tkanką mięszu jabłek i korzeni marchwi oraz określenie wpływu potencjału wody na badane wartości w okresie przechowywania i obrotu handlowego.

MATERIAL I METODA

Badaniom poddano miąższ jabłek trzech odmian: Gloster, Jonagold i Idared oraz korzenie marchwi odmiany Perfekcja. Zebrane owoce oraz korzenie umieszczono w komorze chłodniczej o kontrolowanej wilgotności w temperaturze 4°C. Wykonano trzy serie pomiarów po czterech, pięciu i sześciu



Rys. 1 Wycinek miąższu w celi C-52.

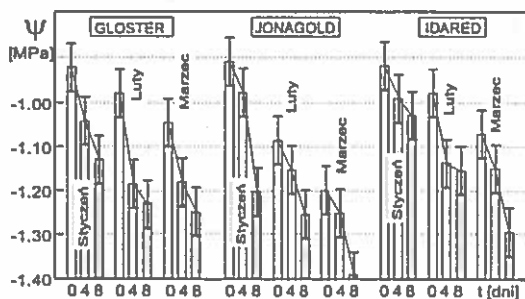
Fig.1. The flesh sample in C-52 chamber.

miesiącach przechowywania (styczeń, luty i marzec). Każdorazowo po wyjęciu owoców lub korzeni (30 szt.) z chłodni badany materiał stabilizowano przed pomiarami przez pięć godzin. Kolejne badania przeprowadzono po czterech i ośmiu dniach przechowywania w temperaturze 20 °C; czyli w warunkach obrotu handlowego. Cylindryczne próbki przeznaczone do pomiaru potencjału wody oraz do testów mechanicznych wycinane były w kierunku do środka geometrycznego owocu. Zastosowano następujące prędkości deformacji 1,10, 20, 50, 100 i 200 mm/min. Podczas eksperymentu rejestrowano parametry punktu naprężenia krytycznego i absorbowanej

energii. Potencjał wody w owocach mierzono metodą higrometryczną przy użyciu mikrowoltomierza HR-33T i komory C-52 (Rys. 1) f-my Wescor. Metoda polega na pomiarze temperatury punktu rosy powietrza wokół tkanki. Próbkę tkanki były zamykane hermetycznie w komorze pomiarowej i po osiągnięciu stanu równowagi temperatury i prężności pary wodnej określano potencjał wody. W przypadku jabłek określono eksperymentalnie, że 12 minut jest to minimalny czas po którym ustala się stan równowagi. Pomiar punktu rosy dostępny w urządzeniu HR-33T polega na ochłodzeniu złącza termopary do temperatury bliskiej punktu rosy a następnie utrzymywanie złącza w tej temperaturze poprzez kompensowanie dopływu ciepła do złącza. Dzięki temu możliwe jest utrzymanie złącza termopary w temperaturze bliskiej punktu rosy i uzyskanie na mierniku ciągłego wskazania. Temperatura punktu rosy, a co za tym idzie wilgotności względnej powietrza jest ściśle związana z potencjałem wody. Do kalibracji przyrządu użyto standardowych roztworów KCL.

WYNIKI

W czasie trwania eksperymentu potencjał wody w jabłkach malał w miarę upływu czasu. Po czterech miesiącach przechowywania potencjał wody w tkance miąższu jabłek badanych odmian przyjmował zbliżone wartości (ok. -0.9 MPa). Po kolejnych miesiącach przechowywania potencjał wody malał, jednak istotnie statystycznie różnice zaobserwowano dla miąższu jabłek odmiany Jonagold. Istotnie mniejsze wartości dla miąższu pozostałych odmian zaobserwowano dopiero po sześciu miesiącach przechowywania chłodniczego. Przechowywanie w warunkach obrotu handlowego w temperaturze 20°C powodowało zdecydowany spadek potencjału wody w miąższu jabłek wszystkich badanych odmian już po czterech dniach, a po ośmiu dniach zaobserwowano statystycznie istotne w każdym przypadku zmiany przy $\alpha=0.05$. Najmniej narażone na utratę jędrności są jabłka odmiany Idared, w których potencjał wody przyjmował średnie wartości nie mniejsze niż



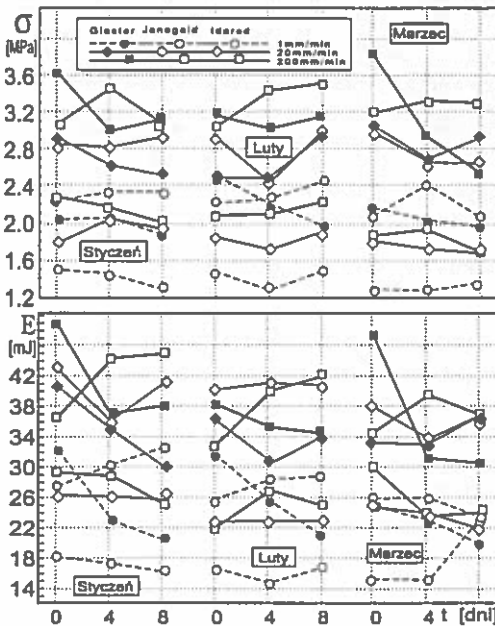
Rys. 2. Potencjał wody jabłek przechowywanych w trakcie 8 dni obrotu handlowego.

Fig. 2. Water potential of apple storage at 8 days of shelf life.

-1.04 MPa po czterech miesiącach przechowywania i przetrzymywania w warunkach obrotu handlowego. Po następnym miesiącu potencjał zmienił się nieznacznie z -0.92 do -0.98 MPa, jednak przetrzymywanie owoców w temperaturze 20 °C powodowało większą utratę jędrności jabłek, których miąższ charakteryzował się po 4 i 8 dniach potencjałem wody odpowiednio od -1.14 MPa do -1.16 MPa. Po sześciu miesiącach przechowywania chłodniczego owoce narażone były na utratę wody w większym stopniu w okresie obrotu handlowego i potencjał wody miąższu jabłek odmiany Idared po tym okresie

malą do wartości -1.30 MPa, a odmiany Jonagold nawet do -1.39MPa.

Rysunek 3 prezentuje wartości średnie naprężenia krytycznego próbek miąższu jabłek przy różnych prędkościach deformacji dla trzech terminów badań. Wartości średnie naprężeń krytycznych wykazywały różnice wytrzymałości mechanicznej miąższu jabłek poszczególnych odmian. Dla wszystkich badanych odmian największe wartości uzyskano przy prędkości przesuwu głowicy 200 mm/min. Naprężenie krytyczne miąższu jabłek odmiany Gloster po wyjęciu z chłodni, osiągało wartość 3.85 MPa, którego w trakcie obrotu handlowego i przechowywania w temperaturze 20 °C wartość malała do 2.5 MPa. Najniższą wytrzymałość mechaniczną miąższu jabłek odmiany Jonagold potwierdzają wartości naprężeń krytycznych w zakresie



Rys. 3. Wytrzymałość krytyczna oraz energia dla różnych prędkości deformacji jabłek przechowywanych i w trakcie obrotu handlowego.

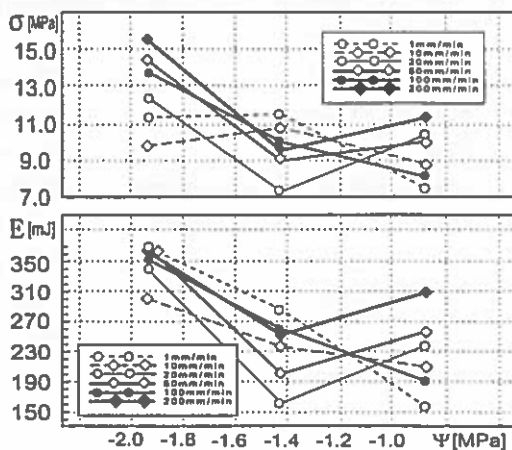
Fig. 3. Critical strength and energy at different rate of deformation after storage and shelf life of apple.

1.25÷1.5 MPa, otrzymane przy prędkości deformacji 1 mm/min, niezależnie od czasu przechowywania chłodniczego i warunków obrotu handlowego. Wartość energii podczas deformacji krytycznej miąższu, zwłaszcza po czterech i ośmiu dniach symulowanego obrotu handlowego pozwala zaobserwować wpływ przechowywania w temperaturze 20 °C w stosunku do wartości uzyskanych bezpośrednio po wyjęciu z chłodni (rys. 3). Większe wartości energii związane są

głównie z dalszą deformacją miąższu jabłek o niższym potencjale wody, zaś wzrost wartości naprężeń krytycznych wraz ze wzrostem prędkości odkształcania potwierdza lepkosprężyste zachowanie się miąższu podczas deformacji. Jednak, nie stwierdzono istotnych statystycznie zależności odmianowych prędkości odkształcania i okresu badań, a brak zależności pomiędzy tymi parametrami potwierdza prawdziwość hipotezy dotyczącej kryterium odkształcania krytycznego dla jabłek w warunkach eksperymentu. Zmienność energii zaabsorbowanej oraz zbliżone przebiegi naprężeń w próbce w punkcie krytycznym potwierdzają zaobserwowane zależności wyznaczone dla wartości naprężeń krytycznych.

Naprężenia krytyczne tkanki przechowywanych korzeni marchwi przedstawione na rysunku 4 wskazują na wpływ potencjału wody. Dla większych wartości potencjału; -1.95MPa , świadczących o mniejszej jędrności korzeni, naprężenia krytyczne osiągają wartość 15.6MPa przy prędkości deformacji 200mm/min . Zakres potencjału wody od -0.93MPa do -1.4MPa zapewnia korzeniom zachowanie jędrności podczas przechowywania. Potwierdzają to wartości naprężeń krytycznych, dla których w tym zakresie nie zaobserwowano wpływu prędkości

deformacji. Kryterium odkształcania krytycznego wywodzi się z założenia, że część energii pochłoniętej przez próbkę w czasie deformacji mechanicznej powodującej sprężyste odkształcenie tkanki jest stała i niezależna od prędkości deformowania. Kiedy jej wartość jest przekraczana tkanka ulega zniszczeniu. Przekroczenie stałej, krytycznej wartości tej energii może mieć miejsce tylko przy zastosowaniu określonego odkształcania. Naprężenie natomiast zależy od prędkości i nie posiada stałej wartości w różnych warunkach obciążeń mechanicznych. Określenie zakresu zastosowań kryterium odkształcania krytycznego było możliwe dzięki pomiarom wartości ogólnego potencjału wody.



Rys. 4. Wytrzymałość krytyczna oraz energia dla różnych prędkości deformacji tkanki korzeni przechowywanej marchwi.

Fig. 4. Critical strength and energy of carrot root tissue at different rate of deformation after storage.

WNIOSKI

Często spotykane w praktyce określenie „jędności” czy „wysokiego turgoru”, ściśle związane z potencjałem wody, jest wskaźnikiem jakości konsumpcyjnej owoców i warzyw. Jednak trudny technicznie pomiar całkowitego potencjału wody stanowi istotną przeszkodę w upowszechnianiu tego typu badań. Wykorzystanie aparatu „Wescor” pozwalającego na pomiary nawet w warunkach polowych daje szansę sprawdzenia przydatności tego parametru dla określenia cech mechanicznych niektórych gatunków owoców i warzyw.

1. Wartości odkształcenia krytycznego próbki miąższu pochodzącego z jabłek przechowywanych wskazują, że wzrost deformacji w pierwszym okresie spowodowany jest spadkiem potencjału wody miąższu, potwierdzając możliwość różnicowania stanu fizycznego jabłek po przechowaniu.
2. Większe wartości energii związane są głównie z dużymi zakresami przemieszczeń w trakcie deformacji miąższu jabłek o niższym potencjale wody, zaś wzrost wartości naprężeń krytycznych dla większych prędkości obciążeń potwierdza lepkosprężyste zachowanie się miąższu podczas deformacji.
3. Ponad dziesięciokrotnie większe wartości energii deformacji tkanki korzeni marchwi odpowiadające naprężeniom krytycznym potwierdzają ich wyższą wytrzymałość mechaniczną od tkanki miąższu jabłek wszystkich badanych odmian.

PIŚMIENNICTWO

1. **Bourne M.C.:** Physical properties and structure of horticultural crops. In *Physical Properties of Foods*, eds. M. Peleg and E.B. Bagley. Westport, CT: AVI Publ. Co. 1983.
2. **De Baerdemeaker, J.G., Segerlind L.I., Murase H., Merva G.E.:** Water potential effect on tensile and compressive failure stress of apple and potato tissue. *ASAE Paper 78: 3057*, 1978.
3. **Brusewitz G.H., Pitt R.E., Gao Q.:** Effects of storage time and static preloading on the rheology of potato tissue. *J. Texture Studies* 20:267-284, 1989.
4. **Falk S., Hertz H., Virgin H.:** On the relation between turgor pressure and tissue rigidity I. Experiments on resonance frequency and tissue rigidity. *Physiol. Plant.* 11:802-817, 1958.
5. **Gao Q., Pitt R.E., Bartsch J.A.:** Elastic-plastic constitutive relations of the cell walls of apple and potato parenchyma. *J. Rheology* 33:233-256, 1989.
6. **Gates R.S., Pitt R.E., Ruina A., Cooke J.R.:** Cell wall elastic constitutive laws and stress-strain behavior of plant vegetative tissue. *Biorheology* 23:453-466, 1986.

7. Gao Q., Pitt R.E.: Mechanics of parenchyma tissue based on cell orientation and microstructure. *Transactions of the ASAE* 34(1):232-238, 1991.
8. Golacki K.: The influence of the deformation speed and water potential on the parameters of plant tissue critical resistance. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 399, 77-82, 1993.
9. Golacki K.: Water potential of apple tissue. *Journal of Food Physics* 2, 38-40, 1994.
10. Golacki K., Rybczyński R., Dobrzański B. jr.: Water potential and failure parameters of apple flesh during storage. *Acta Horticulture*, 485, 167-171, 1999.
11. Golacki K., Dobrzański B. jr., Rybczyński R.: The influence of storage time on failure parameters of apple. *Agric. & Biol. Eng. Conf.*, Newcastle, 4.6, 1-2, 1995.
12. Golacki K., Rybczyński R., Dobrzański B.: Influence of water potential on failure parameters of apple flesh. *Journal of Food Physics*, 2, 41-43, 1994.
13. Golacki K., Obroślak R.: Poisson's ratio and water potential of carrot root. *Proceedings of ISAMA'97*, 233-238, 1997.
14. Kaniewska J., Kowalik P.: Numeryczne rozwiązania równania przepływu wody w glebie. *Problemy Agrofizyki*, 30, 1-61, 1979.
15. Lin T.T., Pitt R.E.: Rheology of apple and potato tissue as affected by cell turgor pressure. *J. exture Studies* 17:291-313, 1986.
16. Malicki M.A.: Zagadnienie oraz technika pomiaru wilgotności gleb i potencjału wody glebowej. *Fizykochemiczne metody badań materiału glebowego*, Zakład Agrofizyki PAN, Lublin, 37-74, 1979.
17. Malicki M.A.: Metodyczne zagadnienia monitoringu statusu wody w wybranych materiałach bilologicznych. *Acta Agrophysica*, 19, 1-108, 1999.
18. McLaughlin N.B., Pitt R.E.: Failure characteristics of apple tissue under cyclic loading. *Transactions of the ASAE*, 27(1): 311-320, 1984.
19. Murase H., Merva G.E., Segerlind L.I.: Variation of Young's modulus of potato as a function of water potential. *ASAE Paper*, No. 79-3065, 1975.
20. Murase H., Merva G.E.: Hydraulic conductivity of vegetative tissue. *Transaction of the ASAE*, 22(5): 877-880, 1979.
21. Nilsson S.B., Hertz C.H., Falk S.: On the relation between turgor pressure and tissue rigidity II. Theoretical calculations on model systems. *Physiol. Plant.* 11, 818-837, 1958.
22. Pitt R.E.: Stress-strain and failure characteristics of potato tissue under cyclic loading. *Journal of Texture Studies*, 15, 131-155, 1984.
23. Slayter R.O.: *Plant-Water Relationship*. Academic Press, London-New York, 1967.
24. Ślusarczyk E., Kośmider E.: Potencjał wody w glebie i roślinie oraz metody jego wyznaczenia. *Problemy Agrofizyki*, 28, 1-41, 1979.
25. Timbers G.E., Statley L.M., Wasten E.L.: Determining modulus of elasticity in agricultural products by loaded plungers. *Agr. Eng.*, 46, 1965.

WATER POTENTIAL OF PLANT TISSUE DURING STORAGE OF CROPS

K. Gołacki, B. Dobrzański, jr¹, R. Rybczyński¹

Department of Machine Theory and Automatics, University of Agricultural
Doświadczalna 50 A, 20-280 Lublin

¹Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27
e-mail: bdob@demeter.ipan.lublin.pl

Summary: Gloster, Jonagold, Idared apples and carrot of Perfekcja cultivar were used in this study. The relationship of water potential and mechanical parameters of tissue were tested every month during storage. The stress and strain relationship were determined at the rate of crosshead move from 1 to 200 mm/min. The mechanical strength of vegetable and fruit tissue related to water potential is a proper indicator of crop firmness during storage and shelf life.

Keywords: fruits, vegetables, tissue, storage, water potential