

WPLYW KĄTA WIERZCHOŁKOWEGO KOŃCÓWKI PENETRATORA NA MIERZONĄ TWARDOŚĆ NASION FASOLI*

J. Frączek, T. Hebda

Katedra Podstaw Budowy Maszyn AR
ul. Balicka 104, 30-149 Kraków
e-mail: fraczek@ar.krakow.pl, thebda@wp.pl

Streszczenie. Celem prezentowanej pracy było określenie wartości kąta wierzchołkowego penetratora stożkowego, przy którym należy przeprowadzać pomiary twardości nasion fasoli. Badania przeprowadzono na trzech odmianach fasoli: Augustynka, Jubilatka oraz Tara. Pomiary zostały wykonane przy pomocy penetratorów o kątach wierzchołkowych równych 90°, 120° i 136°, przy stałej sile nacisku 2 N i sześciu poziomach zawartości wody w badanym materiale (0,11; 0,15; 0,19; 0,23; 0,33; 0,42 kg·kg⁻¹s.m.). Pomiar twardości dokonano przy wykorzystaniu zmodyfikowanej przez autorów metody pomiaru na twardościomierzu PMT-3. Przeprowadzone testy statystyczne wykazały istotny wpływ wartości kąta końcówki penetratora, odmiany i zawartości wody w badanym materiale na twardość.

Słowa kluczowe: twardość, metoda Vickersa, nasiona fasoli.

WSTĘP

Jedną z metod stosowanych w badaniach właściwości mechanicznych roślinnych materiałów ziarnistych jest pomiar twardości. Do jej rozpowszechnienia przyczyniły się nieskomplikowane urządzenia pomiarowe (twardościomierze), jak również łatwość przeprowadzania pomiarów przy małej pracochłonności. Pomiar twardości pozwala na ocenę struktury materiału, jego anizotropii, czy stanu obróbki termicznej [1].

* Praca wykonana w ramach projektu badawczego nr 5P06F 00219 finansowanego przez KBN.

Twardością nazywamy odporność materiału na odkształcenia plastyczne i pęknięcia przy działaniu na jego powierzchnię obciążenia skupionego [2]. Pomiar twardości przeprowadza się najczęściej przez wciskanie w badany materiał wgłębnika nazywanego również penetratorem. W zależności od zastosowanej metody pomiaru końcówka penetratora może mieć kształt kulki (metoda Brinella, metoda Rockwella), stożka (metoda Rockwella, metoda Ludwika) lub ostrosłupa (metoda Vickersa) [3].

Za miarę twardości w wymienionych powyżej metodach przyjmuje się stosunek siły F , którą wywieramy nacisk na wgłębnik do powierzchni powstałego odcisku, lub też do jej rzutu na płaszczyznę prostopadłą do osi wgłębnika. Jednakże wymiary odcisku zależą nie tylko od wartości przyłożonej siły, ale także od czasu jej działania. Tak więc otrzymane wyniki mogą być porównywalne tylko w granicach jednej metody.

Według Pełczyńskiego [4] zaletą pomiaru twardości materiałów konstrukcyjnych przy pomocy penetratorów w kształcie stożka jest zachodzące podobieństwo geometryczne otrzymanych odcisków niezależnie od przyłożonego nacisku. Dodatkową zaletą jest również to, że ostrość zarysu konturu odcisku nie zależy od głębokości na jaką stożek został wciśnięty, gdyż kąt zawarty pomiędzy powierzchnią materiału a powierzchnią boczną stożka jest stały [5].

Z literatury wynika, że do chwili obecnej nie wypracowano żadnych standardów, norm czy sposobów pomiaru twardości ziarnistych materiałów roślinnych [6]. Opracowano natomiast szereg metod, które są często zawodne i nie do końca spełniają swoje zadania. Dodatkowe trudności wynikają także z braku jednoznacznie zdefiniowanych pojęć, a także z braku bezpośrednich przeliczników umożliwiających szybkie i łatwe przejście z jednej metody badawczej do drugiej [6].

CEL PRACY

Celem prezentowanych badań było określenie wartości kąta wierzchołkowego penetratora stożkowego, przy którym należy przeprowadzić pomiary twardości pojedynczych nasion.

Badania przeprowadzono na trzech odmianach nasion fasoli: Augustynka, Jubilatka, Tara. Wszystkie pomiary zostały wykonane przy pomocy penetratorów w kształcie stożka (o kątach wierzchołkowych równych 90° , 120° , 136°) przy stałej sile nacisku (2 N) dla sześciu poziomów zawartości wody (0,11; 0,15; 0,19; 0,23; 0,33 i 0,42 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$).

METODYKA

Materiał roślinny jest typowym materiałem reologicznym, w którym podczas obciążania zachodzą złożone procesy utrudniające prowadzenie badań i wpływają na zafałszowanie otrzymanych wyników. Pierwszym z tych zjawisk jest pełzanie materiału, które powoduje przyrost odkształcenia w czasie, pomimo utrzymywania stałej wartości obciążenia. Drugim z niekorzystnych zjawisk, cechujących roślinne materiały ziarniste, jest sprężystość opóźniona. Powoduje ona, w przypadku badania twardości klasycznymi metodami wytrzymałościowymi, zarastanie odcisku po zdjęciu obciążenia penetratora.

W związku z powyższym w pracy wykorzystano zmodyfikowaną przez autorów metodę pomiaru twardości roślinnych materiałów ziarnistych. W metodzie tej pomiar wartości zagłębienia penetratora został wykonany zgodnie z metodą Rockwella na twardościomierzu PMT – 3. Wartość twardości została natomiast obliczona według definicji Vickersa:

$$HV = \frac{P}{F} = P \cdot \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\pi \cdot h^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}} \quad (1)$$

gdzie: F - siła obciążająca wglębnik [N],
 A - pole powierzchni odcisku [mm^2]
 α - kąt wierzchołkowy penetratora [$^\circ$],
 h - wartość zagłębienia penetratora [mm].

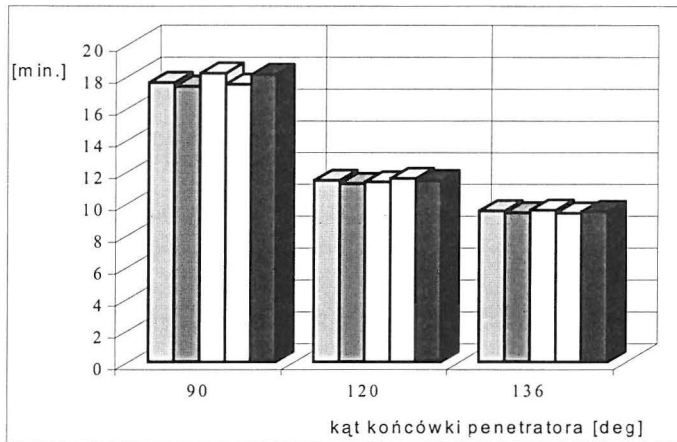
Pomiary zawartości wody w badanym materiale wykonywane były przy pomocy wago-suszarki WPE-300S. Pomiary przeprowadzono na 2,5 gramowych próbkach rozdrobnionych nasion, w temperaturze 130° według PN-91/A-74010, w 5 powtórzeniach przy każdym poziomie zawartości wody dla każdej odmiany i końcówki penetratora.

BADANIA WSTĘPNE

Przed przystąpieniem do badań właściwych przeprowadzono badania wstępne, które zgodnie ze wspomnianym wcześniej zjawiskiem pełzania miały na celu określenie niezbędnego czasu wykonywania pomiaru. Pomiar czasu zagłębienia się penetratora w badany materiał wykonano dla zawartości wody $0,42 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s.m.}$ przy stałym obciążeniu wynoszącym 2 N.

Pomiary wykonywano do momentu ustabilizowania się końcówki wglębnika na pewnym poziomie o czym sygnalizowała nie zmieniająca się wartość odkształcenia

wyświetlana na czujniku. Przykładowe wyniki badań wstępnych zostały przedstawione na Rys. 1. Najkrótszy czas do osiągnięcia stałej wartości odkształcenia uzyskano dla penetratora o kącie wierzchołkowym $\alpha = 136^\circ$. Dla maksymalnej zawartości wody ($0,42 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$) wynosił on ponad 8 minut.



Rys. 1. Czas stabilizacji zagłębienia penetratora w badany materiał (Fasola Tara).

Fig. 1. Setting the time of measurement of the penetrator sinking in the investigation material. Tara bean.

Najdłuższy czas stabilizacji, wynoszący ponad 17 minut (przy tej samej zawartości wody w badanym materiale), wykazał penetrator o kącie wierzchołkowym $\alpha = 90^\circ$. Dla penetratora o kącie wierzchołkowym $\alpha = 120^\circ$ czas pomiaru wyniósł nieco ponad 10 minut. W celu ujednoczenia pomiarów, do dalszych badań przyjęto następujące czasy obciążania penetratora: 10, 15 i 20 minut, odpowiednio dla penetratorów o kątach wierzchołkowych 136° , 120° i 90° .

WYNIKI BADAŃ

Badania właściwe rozpoczęto od pomiaru twardości nasion powietrznie suchych (zawartość wody około $0,11 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$). Po przeprowadzeniu pomiarów nasiona nawilżano w szczelnych pojemnikach do wyższych poziomów zawartości wody okresowo mieszając. Po uzyskaniu żądanej zawartości wody ($0,15$; $0,19$; $0,23$; $0,33$ i $0,42 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{s.m.}$) ponownie przeprowadzano pomiary twardości badanego materiału.

Śród badanych odmian najwyższą twardością (dla wszystkich analizowanych kątów końcówek penetratora) charakteryzowała się fasola Tara. Twardość nasion powietrznie suchych dla penetratorów o kątach wierzchołkowych 90° , 120° oraz 136° wyniosła odpowiednio: $60,43$, $27,97$ i $24,35 \text{ MPa}$. Najniższą twardość, przy tej samej

zawartości wody, stwierdzono dla fasoli Augustynki. Wyniosła ona 36,19, 16,37 oraz 13,18 MPa (dla końcówek penetratora o kątach: 90°, 120° oraz 136°).

Dla wszystkich badanych odmian nasion fasoli zaobserwowano gwałtowny spadek twardości przy wzroście zawartości wody od 0,11 do 0,19 kg·kg⁻¹s.m.:

- fasola Tara:
 - od 58,15 do 8,09 MPa dla penetratora o kącie wierzchołkowym 90°,
 - od 29,43 do 3,06 MPa dla penetratora o kącie wierzchołkowym 120°,
 - od 38,56 do 2,51 MPa dla penetratora o kącie wierzchołkowym 136°,
- fasola Augustynka:
 - od 32,90 do 1,54 MPa dla penetratora o kącie wierzchołkowym 90°
 - od 16,36 do 1,56 MPa dla penetratora o kącie wierzchołkowym 120°,
 - od 13,99 do 1,18 MPa dla penetratora o kącie wierzchołkowym 136°,
- fasola Jubilatka:
 - od 46,89 do 1,81 MPa dla penetratora o kącie wierzchołkowym 90°,
 - od 28,73 do 1,27 MPa dla penetratora o kącie wierzchołkowym 120°,
 - od 20,25 do 0,81 MPa dla penetratora o kącie wierzchołkowym 136°.

Powyżej tego przedziału zawartości wody wartość twardości stabilizowała się.

Wyniki pomiarów opracowano statystycznie. Wykonano trzyczynnikową analizę wariancji z pięcioma powtórzeniami. Jako czynniki główne przyjęto: *odmianę, zawartość wody oraz kąt wierzchołkowy końcówki penetratora*. Przeprowadzony test wykazał istotność wpływu wszystkich czynników głównych na twardość pojedynczych nasion. Istotne statystycznie okazały się również interakcje drugiego rzędu: *zawartość wody x kąt wierzchołkowy końcówki penetratora, odmiana x zawartość wody, odmiana x kąt wierzchołkowy końcówki penetratora*. W dalszej kolejności przeprowadzono testy Duncana.

Wyniki testu Duncana, w przypadku czynników głównych, zamieszczono w Tabeli 1. Stwierdzono istnienie tylko jednej grupy homogenicznej dla czynnika *zawartość wody* w zakresie od 0,33 do 0,42 kg·kg⁻¹s.m. Należy więc uznać, że w tym przedziale zawartości wody badane materiały charakteryzują się podobną statystycznie twardością.

Przeprowadzono również test Duncana dla interakcji *zawartość wody x kąt wierzchołkowy końcówki penetratora* (Tab. 2). Wykazał on istnienie kilku grup homogenicznych. Dla penetratorów o kącie wierzchołkowym 90° i 120° powstała pojedyncza grupa dla zawartości wody od 0,33 do 0,42 kg·kg⁻¹s.m., natomiast dla penetratora o kącie wierzchołkowym 136° powstały dwie grupy homogeniczne: dla zawartości wody od 0,19 do 0,23 oraz od 0,23 do 0,42 kg·kg⁻¹s.m. Świadczy to o tym,

że wzrost wartości kąta wierzchołkowego końcówki penetratora prowadzi do zmniejszenia czułości przeprowadzanych pomiarów. Należy więc uznać, że penetrator o kącie wierzchołkowym 136° jest mało przydatny do pomiaru twardości nasion o wyższej wilgotności.

Tabela 1. Wyniki testu Duncana dla czynników głównych

Table 1. Results of Duncan's test for the main factors

| Czynnik główny | Grupy homogeniczne | | | | | | |
|--|--|--|-----------------------------------|--|--|-------------------------|-------------------------|
| Odmiana | x_1 | | x_2 | | x_3 | | |
| | oznaczenia: $x_1 = 8,82$ - fasola Jubilatka $x_3 = 4,89$ - fasola Augustynka | | $x_2 = 9,30$ – fasola Tara | | | | |
| Zawartość wody | x_1 | | x_2 | x_3 | x_4 | <u>x_5</u> | <u>x_6</u> |
| | oznaczenia: | | | | | | |
| | $x_1 = 31,23$ dla 0,11 [kg·kg ⁻¹ s.m.] | | | | $x_4 = 1,16$ dla 0,23 [kg·kg ⁻¹ s.m.] | | |
| | $x_2 = 10,90$ dla 0,15 [kg·kg ⁻¹ s.m.] | | | | $x_5 = 0,37$ dla 0,33 [kg·kg ⁻¹ s.m.] | | |
| $x_3 = 2,13$ dla 0,19 [kg·kg ⁻¹ s.m.] | | | | $x_6 = 0,23$ dla 0,42 [kg·kg ⁻¹ s.m.] | | | |
| Wartość kąta końcówki penetratora | x_1 | | x_2 | | x_3 | | |
| | oznaczenia: $x_1 = 11,55$ dla kąta 90° | | $x_2 = 6,39$ dla kąta 120° | | $x_3 = 5,07$ dla kąta 136° | | |

* - różnice nieistotne podkreślono.

Tabela 2. Test Duncana dla interakcji *kąt wierzchołkowy końcówki penetratora x zawartość wody*

Table 2. Duncan's test for interaction final *cone-angle penetrator x water content*

| Kąt | Grupy homogeniczne | | | | | |
|-------------|--------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 90° | x_{11} | x_{21} | x_{31} | x_{41} | <u>x_{51}</u> | <u>x_{61}</u> |
| 120° | x_{12} | x_{22} | x_{32} | x_{42} | <u>x_{52}</u> | <u>x_{62}</u> |
| 136° | x_{13} | x_{23} | <u>x_{33}</u> | <u>x_{43}</u> | <u>x_{53}</u> | <u>x_{63}</u> |
| | $x_{11} = 47,51;$ | $x_{21} = 16,08;$ | $x_{31} = 3,06;$ | $x_{41} = 1,70;$ | $x_{51} = 0,58;$ | $x_{61} = 0,38;$ |
| | $x_{12} = 24,18;$ | $x_{22} = 10,75;$ | $x_{32} = 1,89;$ | $x_{42} = 1,05;$ | $x_{52} = 0,30;$ | $x_{62} = 0,19;$ |
| | $x_{13} = 22,00;$ | $x_{23} = 5,87;$ | $x_{33} = 1,44;$ | $x_{43} = 0,74;$ | $x_{53} = 0,22;$ | $x_{63} = 0,14;$ |

oznaczenia: x_{ij}

gdzie: i – kąt wierzchołkowy penetratora, 1 - 90° , 2 - 120° , 3 - 136° ,

j – zawartość wody: 1-0,11 [kg·kg⁻¹s.m.], 2-0,15 [kg·kg⁻¹s.m.], 3-0,19 [kg·kg⁻¹s.m.], 4-0,23 [kg·kg⁻¹s.m.], 5-0,33 [kg·kg⁻¹s.m.], 6-0,42 [kg·kg⁻¹s.m.].

* - różnice nieistotne podkreślono.

W Tabeli 3 przedstawiono wyniki testu Duncana dla interakcji *kąt wierzchołkowy końcówki penetratora x odmiana*. Stwierdzono istnienie jednej grupy homogenicznej w przypadku kąta wierzchołkowego 90° dla fasoli Jubilatka i Tara.

Tabela 3. Test Duncana dla interakcji *kąt wierzchołkowy końcówki penetratora x odmiana*

Table 3. Duncan's test for interaction final *cone-angle penetrator x kind of bean*

| Odmiana | Grupy homogeniczne | | |
|---------|--|--|---|
| 90° | x ₁₁ | x ₁₂ | x ₁₃ |
| 120° | x ₂₁ | x ₂₂ | x ₂₃ |
| 136° | x ₃₁ | x ₃₂ | x ₃₃ |
| | x ₁₁ = 13,27; x ₂₁ = 8,22; x ₃₁ = 7,29; | x ₁₂ = 13,71; x ₂₂ = 6,91; x ₃₂ = 4,96; | x ₁₃ = 7,68; x ₂₃ = 4,04; x ₃₃ = 2,95; |

oznaczenia:

x_{ij} gdzie: i - kąt wierzchołkowy penetratora: 1-90°, 2-120°, 3-136°

j - zawartość wody: 1 – fasola Jubilatka, 2 – fasola Tara, 3 – fasola Augustynka..

* - różnice nieistotne podkreślono.

Podsumowując należy stwierdzić, iż spośród trzech badanych penetratorów najbardziej przydatny do badania twardości pojedynczych nasion fasoli okazał się wgłębnik o kącie wierzchołkowym 120°. W przypadku penetratora o kącie wierzchołkowym 90° stwierdzono bardzo wysokie wartości twardości. Dodatkowo stwierdzono brak statystycznie istotnych różnic między odmianami Tara i Jubilatka, co świadczy o niskiej czułości przyrządu. Ponadto, jak już wcześniej stwierdzono, wgłębnik o kącie wierzchołkowym 136° nie nadaje się do przeprowadzania pomiarów twardości nasion o dużej zawartości wody. Uplastycznienie materiału, na skutek wzrostu zawartości wody, powoduje bowiem stosunkowo łatwe zagłębianie się penetratora w materiał do pewnego poziomu. Dla penetratora o kącie wierzchołkowym 136° wysokość zagłębienia się stożka w materiał stabilizuje się już przy zawartości wody 0,19 kg·kg⁻¹s.m.

W celu porównania skal twardości zmierzonych za pomocą penetratorów o kątach wierzchołkowych 90° , 120° oraz 136° otrzymane wyniki poddano aproksymacji wybranymi funkcjami.

Największą dokładność aproksymacji ocenianą poprzez współczynnik determinacji R^2 uzyskano dla funkcji potęgowej postaci:

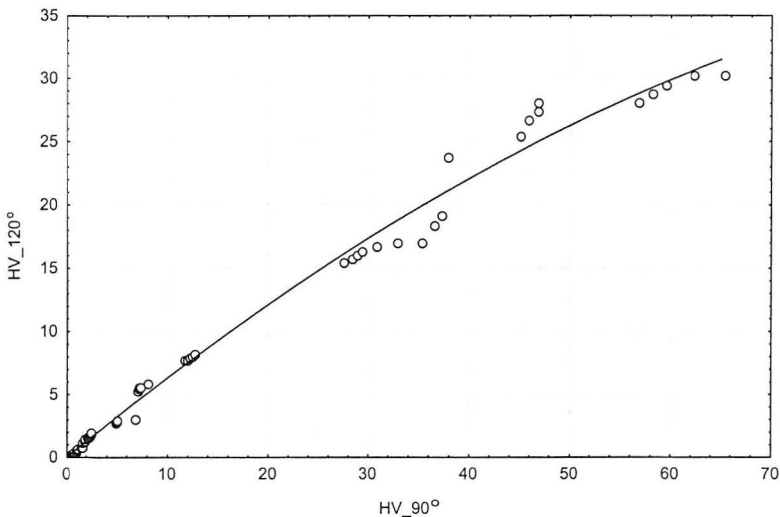
$$y = ax^b \quad (2)$$

gdzie: y - twardość zmierzona za pomocą penetratora o kącie wierzchołkowym $\alpha = 120^\circ$,
 x - twardość zmierzona za pomocą penetratora o kącie wierzchołkowym $\alpha = 90^\circ$ lub $\alpha = 136^\circ$,
 a, b - stałe.

Obliczone dzięki estymacji stałe wynosiły:

- dla penetratora o kącie wierzchołkowym $\alpha = 90^\circ$ (przy $R^2 = 95\%$):
 $a = 1,02$, $b = 0,827$,
- dla penetratora o kącie wierzchołkowym $\alpha = 136^\circ$ (przy $R^2 = 89,8\%$):
 $a = 3,31$, $b = 0,634$.

Na Rys. 2 przykładowo przedstawiono wykres rozrzutu dla funkcji opisującej zależność między twardością zmierzoną penetratorem o kącie wierzchołkowym 90° i 136° .



Rys. 2. Krzywe rozrzutu dla $HV_{120^\circ} = f(HV_{90^\circ})$.

Fig. 2. Chart of dispersion for $HV_{120^\circ} = f(HV_{90^\circ})$.

WNIOSKI

1. Na podstawie badań wstępnych ustalono, że czas niezbędny do stabilizacji zagłębienia penetratora zależy od kąta wierzchołkowego jego końcówki. Dla węgelnika o kącie 90° wynosi on 10 minut, dla węgelnika o kącie 120° - 15 minut, natomiast dla penetratora o kącie 136° - 20 minut.
2. Wykazano istotny wpływ wzrostu zawartości wody na twardość ziarnistego materiału roślinnego. Zaobserwowano, że twardość badanych nasion stabilizowała się przy zawartości wody powyżej $0,23 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s.m.}$
3. Analiza wyników przeprowadzonych testów statystycznych pozwoliła stwierdzić, że wartość kąta końcówki penetratora w sposób istotny wpływa na zmierzoną twardość nasion oraz, że przy pomiarze twardości pojedynczych nasion fasoli wskazane jest wykorzystanie penetratora stożkowego o kącie wierzchołkowym $\alpha = 120^\circ$.

PIŚMIENNICTWO

1. **Frączek J., Hebda T.:** Próba zastosowania metody Rockwella do badania twardości nasion fasoli. Inżynieria Rolnicza, 9,179-187,2001.
2. **Leyko J.:** Słownik terminologii mechaniki klasycznej. PWT, Warszawa, 1960.
3. **Mutermilch J., Jastrzębski P., Orłowski W.:** Wytrzymałość materiałów. Arkady, Warszawa, 1974.
4. **Pelczyński T.:** Twardość metali i ich stopów w aspekcie korelacji z własnościami mechanicznymi. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin, 1996.
5. **Pelczyński T.:** Statyczne pomiary twardości stożkiem. Prace IT i EM, 1978.
6. **Ślipek Z., Kaczorowski J., Frączek J.:** Analiza teoretyczno - doświadczalna tarcia materiałów roślinnych. PTIR, Kraków, 1999.

EFFECT OF PENETRATOR ANGEL IN HARDNESS MEASUREMENTS OF BEAN GRAIN

J. Frączek, T. Hebda

Department of Machine Desing, University of Agriculture, ul. Balicka 104, 30-149 Kraków
e-mail: fraczek@ar.krakow.pl, thebda@wp.pl

Abstract. The purpose of the study was to determine the optimum vertex angle of penetrator at which the measurements of hardness of bean can be performed. The research was carried out on three kinds of beans Augustynka, Jubilatka and Tara. All tests were performed with cone-shape penetrator (at three angles of vertex cone 90, 120 and 136) under the dead load of 2 N for six levels of water content. 0.11; 0.15; 0.19; 0.23; 0.33; 0.42 kg kg⁻¹ d.m. The hardnes measurments were carried out with hardness testing machine PMT – 3. Static tests carried out indicated that each of vertex-cone angle of penetrator, kind of bean and content water had a significant effect on the measurement of hardness in bean grain.

Keywords: hardness, Vickers's method and bean grain.