

ENERGETSKA POTROŠNJA PRI USITNJAVANJU KUKURUZA I SOJINE SAČME

ENERGY CONSUMPTION FOR GRINDING CORN AND SOYBEAN MEAL

V. Kušec, S. Pliestić, M. Stojnović

SAŽETAK

S obzirom na sve veću količinu sirovina koje treba usitniti, a samim tim i veću potrošnju energije koja izravno utječe na cijenu proizvodnje krmnih smjesa, mlin čekićar, odnosno stroj kojim se obavlja usitnjavanje, treba što racionalnije koristiti.

Mlin čekićar je najrašireniji uređaj za usitnjavanje i vrlo je veliki potrošač energije. Na njegovu energetska potrošnju i kakvoću usitnjavanja značajno utječe stanje radnih elemenata.

U radu je mjerena i utvrđivana specifična energetska potrošnja mlina čekićara pri usitnjavanju zrna kukuruza i sojine sačme (11- 14 % vlage) pri različitom stanju radnih elemenata (čekića). Nakon utvrđivanja istrošenosti, radni elementi (čekići) sistematizirani su u tri skupine, novi, poluistrošeni i istrošeni. Energetska potrošnja (kWh/t) utvrđivana je mjerenjem utrošene električne energije elektromotora koji pokreće radne elemente mlina čekićara. Iz rezultata istraživanja može se utvrditi da veća istrošenost radnih elemenata utječe na veću energetska potrošnju kod usitnjavanja kukuruza i sojine sačme.

Ključne riječi: energetska potrošnja, usitnjavanje, istrošeni radni elementi

ABSTRACT

Due to increased amount of feed stuffs that should be ground for increased animal feed mixture production and, consequently, increased energy consumption, directly influencing production costs, a hammer mill should obviously be used more rationally.

A hammer mill is the most commonly used grinding machine and a big energy consumer. Energy consumption of a hammer mill and the quality of grinding is significantly influenced by the state of its working elements (hammers).

In this paper energy consumption of a hammer mill was measured and specific energy consumption was calculated when grinding corn and soybean meal (11-14 % moisture) related to the state of working elements (hammers). After it was determined, that working elements (hammers) were worn-out were grouped into three different groups: new, half worn-out and worn-out hammers. Energy consumption (kWh/t) was determined by measuring electricity consumption of the electric motor for running the working elements of the hammer mill. The results of this investigation show that the more the hammers are worn out, the more energy is needed when grinding corn and soybean meal.

Key words: energy consumption, grinding, worn-out hammers

UVOD

Svjetska energetska kriza kao i negativne klimatske promjene utjecali su na primjenu pogonskih uređaja sa što većim stupnjem korisnog djelovanja, a što manjim utjecajem na prirodu. Kako u industriji, navedena problematika važna je i u poljoprivrednoj proizvodnji. Sve veće potrebe za proizvodnjom ljudske hrane kao važnog resursa, utjecale su i na veće potrebe u proizvodnji hrane za životinje, odnosno krmnih smjesa. Proizvodnja krmnih smjesa, osim miješanja različitih sirovina, zahtijeva i njihovo usitnjavanje. U postupku usitnjavanja različitih poljoprivrednih kultura danas se uglavnom koristi mlin čekićar kao najuniverzalniji uređaj. Za mlin čekićar je poznato, osim da se najčešće primjenjuje za usitnjavanje različitih sirovina, i da je veliki potrošač energije.

Utvrđivanje čimbenika koji utječu na energetska potrošnju pri usitnjavanju može nam omogućiti učinkovitije usitnjavanje i samim tim smanjenje troškova proizvodnje. Kako su kukuruz i sojina sačma komponente većine krmnih smjesa, a elektromotor pogonski stroj primjenjivanih mlinova, istraživanje utjecaja istrošenosti radnih elemenata na potrošnju električne energije pri usitnjavanju navedenih sirovina ima opravdan razlog.

PREGLED LITERATURE

Teorija usitnjavanja (Pfost,1976.) temelji se na sudaranju dviju čestica u prostoru mlina koje se kreću velikom brzinom - v (m/s). Da li će doći do usitnjavanja čestica na više dijelova, odnosno više manjih čestica, ovisi o odnosu vanjske sile F (N) i mehaničke otpornosti materijala koji se usitjava (lomna otpornost), uz pretpostavku da u materijalu nema stranih čestica.

Energija sraza ili rad deformacije koji je potreban za usitnjavanje nastaje iz kinetičke energije E_k (J), a koja ovisi o relativnoj brzini gibanja čestica v (m/s) i udarnoj površini A (m²). Veća brzina gibanja čestica smanjit će rad deformacije koji bi trebao težiti minimumu radi postizanja najvećeg učinka usitnjavanja.

$$\eta = \frac{W_d}{W_u}$$

pri čemu je

η - stupanj korisnog djelovanja mlina

W_d - dobiveni rad, rad utrošen na usitnjavanje [J]

W_u - uloženi rad [J].

Ako se pretpostavi da se dvije čestice mase m_1 i m_2 gibaju brzinom V_1 i V_2 njihova brzina će nakon međusobnog sudaranja biti V (m/s). Tada je kinetička energija čestica:

$$E_{k1} = \frac{m_1 v_1^2}{2} \quad \text{i} \quad E_{k2} = \frac{m_2 v_2^2}{2} \quad [J]$$

odnosno ukupna energija:

$$E_k = E_{k1} + E_{k2} \quad \text{ili} \quad E_k = \frac{(m_1 + m_2) v^2}{2} \quad [J]$$

Razlika kinetičke energije je ona energija koja se koristi za stvaranje nove površine čestica. Energija kod međusobnog sudaranja čestica u mlinu ostaje očuvana, a ne smije se zanemariti i dio energije pretvorene u toplinsku energiju pa bi realna jednadžba trebala biti:

$$\Delta E_0_k = E_{k1} + E_{k2} - E_{\text{toplina}}$$

Pfost (1976.) je istraživao utjecaj istrošenosti čekića mlina na specifičnu energetska potrošnju. Rezultati tog istraživanja prikazani su na tablici 1.

Tablica 1. Utjecaj istrošenosti čekića na specifičnu energetska potrošnju, (Pfost,1976.)

Table 1. Influence of worn-out hammer on specific energy consumption (Pfost, 1976)

MATERIJAL	specifična energetska potrošnja - SEP (kWh/t)		
	A	B	C
ZOB	25,7	27	23,6
KUKURUZ	10,4	11,1	9,5

A – Novi čekić

B – Istrošeni čekić s četvrtastim rubom

C – Istrošeni čekić sa zaobljenim rubom

Pfost (1976.) uspoređuje rad mlina sa standardnim čekićima i čekićima s opterećenim dijelom od tvrdih metala (Widia) pri usitnjavanju zobi. Iz tih rezultata može se zaključiti da je efikasniji rad mlina sa čekićima od tvrdih metala, odnosno čekića koji su se manje trošili.

Ruetsche (1989.) je istraživao utjecaj različitih tehnologija na energetska potrošnju. On navodi da se uporabom konvencionalnog mlina čekićara može postići energetska potrošnja oko 4 kWh/t, a da se manja energetska potrošnja može postići uporabom novih tehnologija.

Osim konstrukcijskih karakteristika mlina čekićara, treba uzeti u obzir i to da na energetska potrošnju utječu i mehanička svojstva sirovina koje usitnjavamo, od kojih je najvažnija mehanička otpornost. Pliestić (1990.) u svojim ispitivanjima mehaničke otpornosti koristi centrifugalni bubanj i utvrđuje različite potencijale zrna kod 27 različitih hibrida kukuruza što ukazuje da na energetska potrošnju u postupku usitnjavanja utječe i izbor hibrida Fang (1997.) ispituje i uspoređuje utjecaj usitnjavanja mlinom s valjcima i usitnjavanja s mlinom čekićarom na energetska potrošnju. Zaključio je da je energetska potrošnja podjednaka kod oba mlina i utvrđuje da kod mlina s valjcima, na energetska potrošnju utječe brzina valjaka i zračnost između valjaka, a kod mlina čekićara na energetska potrošnju utječe promjer otvora sita.

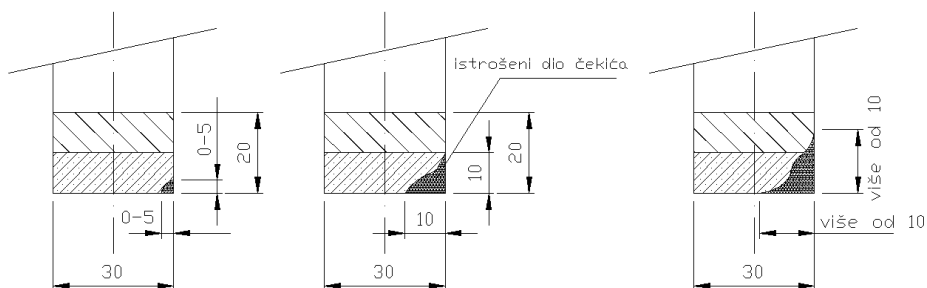
Istraživanjem različitih tipova mlinova koji se koriste pri usitnjavanju žitarica bavio se Heimann (1983.). Utvrđuje da su mlinovi čekićari jednostavniji za rukovanje od mlinova s valjcima i da zahtijevaju manje nadzora. Mlinovi s valjcima stvaraju manje topline za vrijeme rada pa su prema tome učinkovitiji od mlinova čekićara.

MATERIJAL I METODE

Potrošnja električne energije pri usitnjavanju kukuruza i sojine sačme od 11 – 14 % vlage utvrđivana je pri različito istrošenim radnim elementima mlina. Na temelju pretpostavke da veća istrošenost radnih elemenata rezultira većom energetsom potrošnjom, izvršena je sistematizacija radnih elemenata (čekića) u tri skupine.

- A. Novi čekići
- B. Polu-istrošeni čekići
- C. Istrošeni čekići

Istrošenost čekića bila je utvrđena preslikom presjeka čekića na milimetarski papir zbog jednostavne izmjere istrošenog dijela. Nakon izmjerene površine istrošenog čekića, izvršena je sistematizacija u tri navedene skupine. Na slici 1 prikazana je sistematizacija radnih elemenata istraživanog mlina.



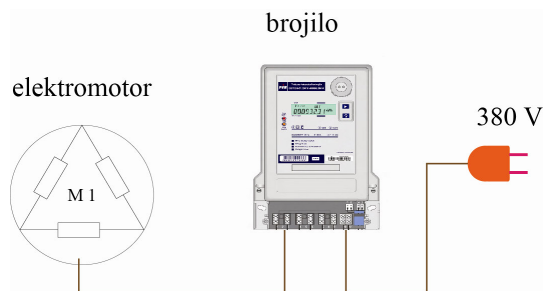
Slika 1. Shematski prikaz utvrđivanja istrošenosti radnih elemenata

Figure 1. Schematic view of worn-out working elements

U postupku usitnjavanja korišten je mlin s tri radna elementa (čekića) koji su specifičnog oblika i nisu uobičajeni u široj praksi. Na slici 2. Shematski je prikazan mlin s osnovnim karakteristikama.

Specifična energetska potrošnja (SEP, kWh/t) utvrđena je mjerenjem utrošene električne energije elektromotora koji pokreće radne elemente mlina čekićara. U istraživanju je korišteno pet uzoraka zrna kukuruza i pet uzoraka sojine sačme. Kod svakog uzorka izvršeno je po 30 mjerenja s novim, poluistrošenim i istrošenim čekićima svakih 10 minuta.

Električno digitalno brojilo RIZ, Tip – EBT 308 postavljeno je između elektromotora koji pokreće mlin čekićar i izvora električne energije (slika 2.).



Slika 2. Shematski prikaz mjerenja potrošnje električne energije

Figure 2. Schematic view of measuring electric energy consumption

Za specifičnu energetska potrošnju (SEP, [kWh/t]) provedena je jednosmjerna analiza varijance odvojeno za kukuruz i sojinu sačmu.

Specifična energetska potrošnja određena je izrazom:

$$SEP = \frac{P}{Q} \quad [\text{kWh/t}]$$

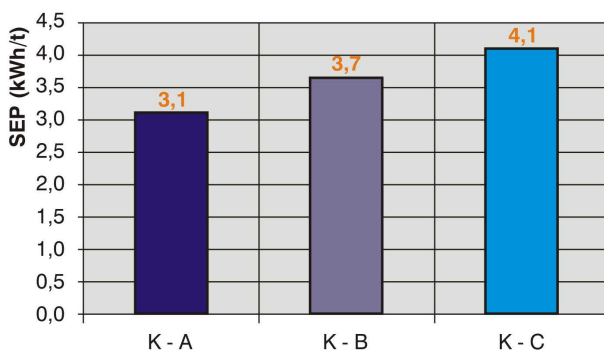
pri čemu je:

P - snaga [kW]

Q - kapacitet mlina [t/h].

REZULTATI ISTRAŽIVANJA

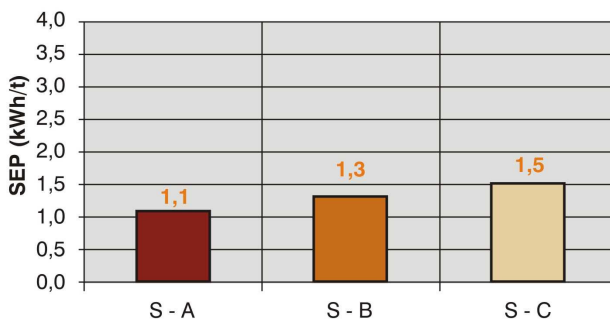
Pri ispitivanju karakteristika rada mlina čekićara kod usitnjavanja kukuruza i sojine sačme s novim, polu-istrošenim i istrošenim čekićima, utvrđen je utjecaj fizikalno tehničkih parametara na energetske potrošnje mlina. Rezultati dobiveni ispitivanjem po navedenim metodama, statistički su obrađeni (Vasilj, 2000.; Petz, 1985.) i prikazani na tablicama i grafički. Rezultati istraživanja specifične energetske potrošnje (električna energija), kod usitnjavanja kukuruza pri različitim istrošenostima čekića, prikazani su na grafikonu 1.



Graf 1. SEP pri usitnjavanju kukuruza

Graph 1. Specific energy consumption in corn grinding

Rezultati istraživanja specifične energetske potrošnje kod usitnjavanja sojine sačme pri različitim istrošenostima čekića, prikazani su na grafikonu 2.



Graf 2. SEP pri usitnjavanju sojine sačme

Graph 2. Specific energy consumption in soybean meal grinding

V. Kušec i sur.: Energetska potrošnja pri usitnjavanju kukuruza
i sojine sačme

Tablica 2. Deskriptivna statistička analiza rezultata istraživanja pri usitnjavanju kukuruza

Table 2. Descriptive statistical analysis of the results of corn grain grinding investigation

broj uzorka		Kapacitet mlina	Specifična energetska potrošnja	Temperatura materijala na ulazu	Temperatura materijala na izlazu	Temperatura okoline
	n	Q (t/h)	kWh/t	t_u (°C)	t_i (°C)	(°C)
K - A	prosjek	3,333	3,090	21,00	26,64	25,27
	st. odstupanje	0,093	0,028	1,436	1,304	1,603
	min	3,175	2,800	18,80	24,10	22,20
	maks.	4,548	3,400	23,40	28,90	28,00
K - B	prosjek	3,028	3,656	9,01	13,65	4,98
	st. odstupanje	0,082	0,116	1,448	1,545	1,165
	min	2,584	3,300	6,20	10,80	2,60
	maks.	3,155	4,400	11,30	15,90	6,40
K - C	prosjek	2,882	4,096	14,11	19,89	10,62
	st. odstupanje	0,169	0,060	2,907	3,783	6,435
	min	2,833	3,800	11,00	15,60	1,80
	maks	5,495	4,800	17,60	24,90	18,10

Analizom varijance izračunata je ukupna varijabilnost svakog uzorka, podijeljena na varijabilnost unutar grupa i varijabilnost između grupa. Hipoteza da uzorci pripadaju istom skupu, odnosno da se njihove prosječne vrijednosti ne razlikuju značajno, testirana je t-testom i uspoređivanjem njihovih razlika s graničnom ili najmanjom signifikantnom razlikom (*LSD*).

Tablica 3. Deskriptivna statistička analiza rezultata istraživanja pri usitnjavanju sojine sačme

Table 3. Descriptive statistical analysis of the results of soybean meal grinding investigation

broj uzorka		Kapacitet mlina	Specifična energetska potrošnja	Temperatura materijala na ulazu	Temperatura materijala na izlazu	Temperatura okoline
	n	Q (t/h)	kWh/t	t_u (°C)	t_i (°C)	(°C)
S - A	prosjek	4,765	1,091	14,11	19,89	10,62
	st. odstupanje	0,055	0,090	1,233	1,253	1,600
	min	4,630	0,900	5,80	6,90	0,60
	maks	5,000	1,600	10,30	11,50	6,30
S - B	prosjek	4,368	1,336	10,02	11,92	5,31
	st. odstupanje	0,052	0,026	0,879	0,813	1,111
	min	4,032	1,100	7,90	9,90	3,10
	maks	4,950	1,800	11,20	13,10	8,10
S - C	prosjek	3,656	1,500	11,77	13,45	8,45
	st. odstupanje	0,061	0,093	1,525	1,631	1,668
	min	3,774	1,200	8,40	10,00	5,50
	maks	4,115	1,800	14,00	15,90	11,20

$$H_0 : \bar{x}_A = \bar{x}_B = \bar{x}_C$$

pri čemu je:

\bar{x}_A - prosječna vrijednost energetske potrošnje – NOVI ČEKIĆI

\bar{x}_B - prosječna vrijednost energetske potrošnje – POLU-ISTROŠENI ČEKIĆI

\bar{x}_C - prosječna vrijednost energetske potrošnje – ISTROŠENI ČEKIĆI

V. Kušec i sur.: Energetska potrošnja pri usitnjavanju kukuruza i sojine sačme

Tablica 4. Analiza varijance pri usitnjavanju kukuruza (n=15)

Table 4. Analysis of variance for corn grain grinding (n=15)

Izvor varijabilnosti	n-1	SS	$s^2 = \frac{SS}{n-1}$	F_{exp}	F_{tab}	
					P = 5%	P = 1%
Ukupno	14	2,618	0,187			
Između grupa	2	2,546	1,273	212,17**	3,88	6,93
Unutar grupa	12	0,072	0,006			

Tablica 5. Analiza pri usitnjavanju sojine sačme (n=15)

Table 5. Analysis of variance for soybean meal grinding (n=15)

Izvor varijabilnosti	n-1	SS	$s^2 = \frac{SS}{n-1}$	F_{exp}	F_{tab}	
					P = 5%	P = 1%
Ukupno	14	0,484	0,035			
Između grupa	2	0,424	0,212	7,07**	3,88	6,93
Unutar grupa	12	0,060	0,005			

Usporedimo li s literaturnim rezultatima Pfosta, vidljivo je da je specifična energetska potrošnja ispitivanog mlina pri usitnjavanju kukuruza manja. To zapravo znači da osim čvrstoće materijala i istrošenosti čekića na energetske potrošnju utječu i fizikalna svojstva materijala (sortiment) koji se usitnjava. U usporedbi s rezultatima Ružičića i Tošića, koji su utvrdili energetske potrošnje mlina 5,5-10 kWh/t, ispitivani mlin bio je daleko ekonomičniji na što su utjecale i tehničke karakteristike uređaja za usitnjavanje. Za razliku od ispitivanog, mlin koji su ispitivali Ružičić i Tošić imao je jedan dvokraki čekić i sito od perforiranog čeličnog lima.

Vrijednosti energetske potrošnje ispitivanog mlina u sva tri slučaja istrošenosti čekića pri usitnjavanju kukuruza mogu se usporediti s rezultatima energetske potrošnje mlina koji je ispitivao Wondra (1995). Kod usitnjavanja zrna kukuruza do veličine čestica od 600 μm , izmjerio je energetske potrošnje od 3,8 kWh/t. Kod usitnjavanja zrna kukuruza do veličine čestica 400 μm , izmjerio je energetske potrošnje od 8,1 kWh/t, što je dvostruko više od potrošnje ispitivanog mlina kod usitnjavanja s istrošenim čekićima. Treba

spomenuti da je on za usitnjavanje koristio mlin s kamenim valjcima, što je utjecalo na različite rezultate energetske potrošnje mlina kojeg je on istraživao i ispitivanog mlina.

Osim potrošnje energije, u radu je utvrđivano zagrijavanje materijala pri usitnjavanju. Iz rezultata mjerenja temperature materijala na ulazu i izlazu mlina vidljivo je da se dio energije utroši na zagrijavanje. Ružičić i Tošić (1970.) istražuju energetska potrošnja mlina čekićara te zagrijavanje materijala kod usitnjavanja i na temelju tih rezultata utvrđuju kakvoću rada mlina.

Oni utvrđuju prosječnu vrijednost zagrijavanja na 9,3 °C od usitnjavanja s mlinom čiji je promjer sita 2,5mm i 4,5 °C kod usitnjavanja s mlinom čiji je promjer sita 4 mm. U usporedbi s istraživanim mlinom, vrijednosti zagrijavanja se značajno ne razlikuju. Za značajniji utjecaj zagrijavanja na rad mlina potrebno je provesti dodatna istraživanja što nije bio cilj ovog rada.

ZAKLJUČCI

Iz rezultata dobivenih istraživanjem utjecaja istrošenosti radnih elemenata na energetska potrošnja pri usitnjavanju zrna kukuruza i sojine sačme, može se zaključiti da veća istrošenost rezultira većom energetskom potrošnjom.

Pri usitnjavanju kukuruza s novim čekićima prosječna vrijednost 5 uzoraka za SEP bila je 3,0894 kWh/t, s poluistrošenim čekićima prosječna vrijednost SEP_a bila je 3,6560 kWh/t, što je za 15,5 % više nego pri usitnjavanju s novim čekićima, a pri usitnjavanju kukuruza s istrošenim čekićima prosječna vrijednost za SEP bila je 4,0960 kWh/t, što je za 12,0 % više nego pri usitnjavanju s polu-istrošenim čekićima i za 32,6 % više nego pri usitnjavanju s novim čekićima.

Pri usitnjavanju sojine sačme s novim čekićima prosječna vrijednost 5 uzoraka za SEP bila je 1,0913 kWh/t, pri usitnjavanju sojine sačme s polu-istrošenim čekićima prosječna vrijednost SEP-a bila je 1,3360 kWh/t, što je za 22,4 % više nego pri usitnjavanju s novim čekićima. Pri usitnjavanju s istrošenim čekićima prosječna vrijednost SEP-a bila je 1,5 kWh/t, što je za 12,3 % više nego pri usitnjavanju s polu-istrošenim čekićima i za 37,5 % više nego pri usitnjavanju s novim čekićima.

Ako uzmemo u obzir relativno malu cijenu troškova izmjene radnih elemenata u odnosu na cijenu energije pri usitnjavanju kukuruza, može se zaključiti da bi ranija izmjena bila isplativa. S obzirom na relativno malu specifičnu energetska potrošnju pri usitnjavanju sojine sačme, izmjena čekića nije značajna. Osim utjecaja istrošenosti čekića na energetska potrošnju, ne smije se zanemariti da istrošenost čekića utječe i na kakvoću rada mlina kao i na radni učinak.

LITERATURA

1. Fang, Q., (1997): Comparison of energy efficiency between a roller mill and a hammer mill. Applied engineering in agriculture. Vol. 13 (5). str. 631-635.
2. Heimann, M. A., (1988.): Energy consumption and machine efficiency in particle reduction: A roller mill and hammermill comparison. First International Symposium on Particle Size Reduction in the Feed Industry. Kansas State Univ., Manhattan.
3. Petz, B., (1985): Osnovne statističke metode za nematematičare. Zagreb. Sveučilišna naklada Liber.
4. Pfost, H.B., (1976 a.): Grinding and rolling. Basic processing operations, «American Feed Manufacturers Association», Kansas State University, USA. str. 71-84.
5. Pfost, H.B., (1976 b.): Feed Mixing. Feed manufacturing technology, «American Feed Manufacturers Association», Kansas State University, USA. str. 115-134.
6. Pliستیć, S., (1989.): Komparativna analiza oštećivanja različitih hibrida kukuruza dinamičkim opterećivanjem, Magistarski rad, FPZ, Zagreb.
7. Ruetsche, P., (1989): The Progressive Animal Feed Production and its Fundamentals, Part 1: Grinding/Sieving in the Feed Milling Industry, Advances in Feed Technology No 1. Verlag Moritz Schäfer; Detmold. str. 8-37.
8. Ružičić, N., Tošić, M., (1970): Prilog proučavanju krunjača s prekrupačem, Aktualni problemi mehanizacije poljoprivrede, Opatija. str. 481-495.
9. Vasilj, Đurđica, (2000): Biometrika i eksperimentiranje u bilnogojstvu, Hrvatsko agronomsko društvo, Zagreb.

10. Wondra, K.J., (1995 a.): Effects of particle size and pelleting on growth performance, nutrient digestibility, and stomach morphology in finishing pigs. J. Anim. Sci. Vol.73. str. 7-57.
11. Wondra, K.J., (1995 b.): Effects of mill type particle size uniformity on growth performance, nutrient digestibility, and stomach morphology in finishing pigs. Journal of animal science. Vol. 73 (9). str. 438-455.

Adrese autora – Authors' addresses:

mr. sc. Vlado Kušec,
mr. sc. Miomir Stojnović
Visoko gospodarsko učilište u Križevcima,
M. Demerca 1, 48 260 Križevci,
e-mail: vkusec@vguk.hr
e-mail: mstojnovic@vguk.hr

Primljeno – Received:

17.02.2012.

dr. sc. Stjepan Pliestic,
Agronomski fakultet – Zagreb,
Zavod za poljoprivrednu tehnologiju, skladištenje i transport,
Svetošimunska cesta 25, 10 000 Zagreb,
e-mail: spliestic@agr.hr

