

WŁADYSŁAW KUSIAK, KRZYSZTOF MOLIŃSKI, RYSZARD WALKOWIAK

Model zużycia paliwa przy pozyskaniu drewna sosnowego

Model of fuel consumption during harvesting of pine wood

ABSTRACT

Kusiak W., Moliński K., Walkowiak R. 2012. Model zużycia paliwa przy pozyskaniu drewna sosnowego. Sylwan 156 (3): 218-224.

Basing on the stand and technological characteristics models that demonstrate the amount of fuel consumed during pine wood harvesting were elaborated. These models allow to evaluate the degree of energy consumption during harvesting works and can be used to select a pro-environmental technology.

KEY WORDS

fuel, efficiency, pine, wood harvesting

ADDRESSES

Władysław Kusiak ⁽¹⁾ – e-mail: kusiak@up.poznan.pl
 Krzysztof Moliński ⁽²⁾ – e-mail: krys@up.poznan.pl
 Ryszard Walkowiak ⁽²⁾ – e-mail: rwal@up.poznan.pl

⁽¹⁾ Katedra Inżynierii Środowiska Pracy; Uniwersytet Przyrodniczy; ul. Wojska Polskiego 38/48; 60-637 Poznań

⁽²⁾ Katedra Metod Matematycznych i Statystycznych; Uniwersytet Przyrodniczy; ul. Wojska Polskiego 28; 60-637 Poznań

Wstęp

Lasy w Polsce zajmują około 9,1 mln ha, czyli 29,1% powierzchni kraju. Na blisko $\frac{3}{4}$ powierzchni leśnej rosną gatunki iglaste, takie jak sosna, świerk, jodła i modrzew, przy czym największą powierzchnię (ponad 60%) zajmują drzewostany sosnowe. Roczne pozyskanie drewna kształtuje się na poziomie około 34 mln m³. W roku 2009 wyniosło 34,6 mln m³, z czego prawie 50% przypada na dojrzałe drzewostany rębne, a reszta na drzewostany przedrębne i związana jest z cięciami pielęgnacyjnymi [Leśnictwo 2010]. Surowiec drzewny w lesie pozyskuje się metodą drewna długiego oraz drewna krótkiego (sortymentową), w około 90% przy użyciu pilarek spalinyowych i w 10% z zastosowaniem maszyn wielooperacyjnych [Kusiak 2008].

W zależności od wieku drzewostanu, rodzaju zabiegu, przyjętej metody i technologii prac oraz z uwagi na zapotrzebowanie rynkowe pozyskiwane są różnorodne sortymenty drzewne, co wpływa na wydajność pracy, a istotnym miernikiem określającym energochłonność jest zużyte w procesie pozyskania drewna paliwo. Czynnikiem wpływającymi na wielkość zużycia paliwa przy pozyskaniu drewna są cechy drzewostanu, takie jak gatunek, wiek, wysokość, pierśnica, miąższość, zasobność i jakość drzewostanu oraz cechy technologiczno-techniczne, do których należą przyjęta metoda pracy, rodzaj zabiegu gospodarczego, intensywność cięcia, pozyskiwane sortymenty drzewne, użytkowane środki techniczne, liczba pracujących robotników, umiejętności operatorów i panujące warunki atmosferyczne. Zagadnieniami zużycia paliwa w procesie pozyskania drewna zajmowali się Gieffing i Tabka [1993], Laurow [1994], Gieffing i Mostefa [1994], Gieffing i Klentak [1999], Więsik [1988], Więsik i Wójcik [2007] oraz Kusiak i Czechłowski [2009].

Celem pracy jest opracowanie modelu matematycznego obrazującego zmienność zużycia paliwa przy pozyskaniu drewna sosnowego w zależności od różnych cech drzewostanowych oraz uwarunkowań technologicznych. Model ten ma pozwolić na określenie stopnia energochłonności prac pozyskaniowych, mierzonego stopniem zużyciem paliwa.

Materiał i metody

Do badań wybrano leżący w widłach Warty i Noteci Leśny Kompleks Promocyjny „Puszcza Notecka”, który obejmuje 137 273 ha. Według regionalizacji fizyczno-geograficznej teren wchodzi w skład prowincji Niżu Środkowoeuropejskiego, mikroregionu Międzyrzecza Warty i Noteci [Kondracki 2002]. Drzewostany Puszczy Noteckiej cechuje bardzo wysoki (92,8%) udział sosny. Tworzą one typową monokulturę, w której przeważają drzewostany IV i V klasy wieku. Większa część kompleksu obejmuje ubogie w składniki pokarmowe gleby, a dominującym siedliskiem leśnym jest bór świeży, mający 65,5% udziału i bór mieszany świeży (20,1%). Łączny udział siedlisk borowych stanowi 87% [Kusiak 2007]. Dla porównania, w Polsce udział siedlisk borowych wynosi 59,6% powierzchni zajmowanej przez lasy [Leśnictwo 2010].

Założenia metodyczne obejmowały przeprowadzenie badań w warunkach technologicznych, bez ingerencji w organizację oraz stosowaną technikę i technologię pracy. Wyznaczono 13 powierzchni badawczych, zlokalizowanych w zróżnicowanych wiekowo drzewostanach, w których różni wykonawcy wykonali zabiegi gospodarcze różnymi technologiami. Badania polegały na pomiarze zużycia paliwa przypadającego na pozyskanie jednego metra sześciennego drewna, co obejmowało ścinę drzewa, okrzesanie strzały oraz wyrzynkę sortymentów. Wielkość zużytego paliwa przy pozyskaniu drewna metodą ręczno-maszynową za pomocą pilarki mierzono z dokładnością do $0,01 \text{ dm}^3/\text{m}^3$. Na każdej powierzchni badawczej mierzono z dokładnością do 5 minut rzeczywisty czas pracy robotników, obejmujący wyłącznie czas odnoszący się do wykonywanej pracy przy pozyskaniu drewna. Pomiar masy wyrobionych sortymentów drzewnych (WC, S10, S3, S2a, S2b, S4, M1) przeprowadzono na podstawie obowiązującej w Lasach Państwowych normy PN-D-95000 [2002]. Spośród 13 wyznaczonych losowo powierzchni na 11 prace prowadzone były metodą drewna długiego, a na 2 pozostałych – metodą drewna krótkiego (sortymentową). Z uwagi na typ zabiegu wybrano 2 powierzchnie, na których wykonywana była trzebież wczesna, 7 powierzchni z zabiegiem typu trzebieży późnej oraz 4 powierzchnie zrębowe z rębnią Ia.

Scharakteryzowano następujące cechy drzewostanowe oraz technologiczne: wiek, zasobność drzewostanu, wysokość i pierśnicę drzewa, typ zabiegu gospodarczego, pozyskaną masę drewna z podziałem na grupy i liczbę sortymentów, liczbę robotników i czas ich pracy, zużyte paliwo oraz godzinową wydajność pracy. Dane taksacyjne drzewostanów zaczerpnięto z Systemu Informacji Lasów Państwowych. W odniesieniu do każdej powierzchni badawczej odnotowano datę badań, metodę pozyskania drewna, liczbę pracujących robotników, rzeczywisty czas ich pracy, stosowane pilarki, ilość pozyskanego drewna, wielkość zużytego paliwa oraz zużycie oleju smarowego. Uzyskane dane poddano analizie statystycznej. W pierwszej kolejności obliczono statystyki podstawowe, tzn. wartość średnią, minimalną i maksymalną oraz współczynnik korelacji pomiędzy poszczególnymi cechami [Morrison 1990]. Aby zbadać wpływ poszczególnych sortymentów na zużycie paliwa, przeprowadzono analizę wariancji dla modelu jednoczynnikowego, w którym czynnikiem był typ zabiegu pielęgnacyjnego (trzy poziomy), a zmienną obserwowaną – zużycie paliwa [Elandt 1964].

O niektórych cechach, jak np. wiek drzewostanu i wysokość drzewa, z góry wiadomo, że są ze sobą skorelowane. Istnienie takich korelacji nasuwa zawsze przypuszczenie, że usunięcie

niektórych z nich z modelu regresji liniowej spowoduje nieznaczną utratę dokładności przewidywania, przy jednoczesnym znacznym zmniejszeniu pracochłonności obliczeń wynikającym przede wszystkim z rezygnacji z badania niektórych cech.

Doboru cech użytych do przewidywania zużycia paliwa dokonano metodą regresji krokowej wstecznej (ang. stepwise backward regression) [Jennrich, Sampson 1968]. W metodzie tej początkowo przyjmuje się, że równanie regresji liniowej zawiera wszystkie badane zmienne. Następnie ustala się wartości dwóch poziomów istotności dla statystyki F Fischera – p_1 do wprowadzania zmiennych do modelu i p_2 do usuwania zmiennych z modelu ($p_1 \leq p_2$). W pierwszym kroku obliczane są wartości statystyki F oraz odpowiadające im poziomy istotności p dla każdej zmiennej objaśniającej i usuwana jest z modelu ta zmienna, dla której obliczony poziom istotności najbardziej przekracza wartość p_2 . W następnych krokach powtarza się procedurę usuwania zmiennej z modelu. Następnie dołącza się do modelu kolejno każdą ze zmiennych usuniętych w poprzednich krokach i pozostawia tę, dla której obliczony poziom istotności jest mniejszy od p_1 . Procedurę kończy się, gdy nie można już usunąć ani dołączyć żadnej zmiennej. Ostatecznie, po ustaleniu zbioru zmiennych występujących w modelu, przeprowadzono standardową analizę regresji wielokrotnej [Morrison 1990]. Procedurę tę powtórzono przy modelowaniu wydajności pracy. Wszystkie obliczenia wykonano przy pomocy pakietu Statistica 9.0.

Wyniki

Wiek drzewostanów na powierzchniach badawczych zawierał się w przedziale od 40 do 109 lat i średnio wynosił 72,5 roku (tab. 1). Przeciętna wysokość drzew wahała się od 10 do 25 m (średnio 17,8 m). Przeciętna pierśnica zawierała się w zakresie od 9 do 30 cm (średnio 20 cm). Przeciętna miąższość drzewa wynosiła od 0,02 do 0,66 m³, średnio 0,29 m³ (tab. 1). Wielkość pozyskanego drewna wynosiła od 11,59 m³ do 106,17 m³. Ogółem pozyskano 6 rodzajów sortymentów drzewnych – WC, S10 i S3 o charakterze dłużycowym oraz S2, S4 i M o charakterze stosowym.

Tabela 1.

Wartości wybranych analizowanych cech
Values of selected characteristics under the analysis

Nr pow.	Zabieg gospodarczy	Zużycie paliwa [dm ³ /m ³]	Wydaj. pracy [m ³ /h]	Miąższość drzewa [m ³]	Wiek drzewo- stanu [lata]	Wys. drzewa [m]	Pierśnica drzewa [cm]	Grupa S2, S3, S4, M [m ³]	Grupa WC, S10 [m ³]
1	TP	0,24	1,54	0,26	73	17	21	23,11	0,00
2	TW	0,33	0,64	0,02	40	10	9	47,55	0,00
3	TP	0,35	0,47	0,21	75	18	18	24,10	0,00
4	TP	0,32	1,01	0,16	69	16	17	16,69	0,00
5	Rb Ia	0,17	1,75	0,46	109	19	26	21,95	6,86
6	TW	0,30	1,02	0,06	51	13	12	35,63	0,00
7	Rb Ia	0,18	1,46	0,23	79	18	19	14,72	9,44
8	Rb Ia	0,13	2,83	0,64	80	21	30	18,59	87,58
9	Rb Ia	0,12	2,55	0,23	69	17	20	3,26	22,21
10	TP	0,18	1,06	0,23	69	17	20	21,18	0,00
11	TP	0,31	1,05	0,46	81	22	24	14,80	13,50
12	TP	0,33	1,06	0,26	81	19	19	19,10	0,00
13	TP	0,16	1,36	0,57	67	25	25	11,59	0,00
Minimum		0,12	0,47	0,02	40	10	9	3,26	6,86
Maksimum		0,35	2,83	0,64	109	25	30	47,55	87,58
Średnia		0,23	1,19	0,29	73	18	20	20,90	10,70

Przeważał surowiec stosowy typu S2 – 257,01 m³ (51,1%) i dłużycowy WC – 161,94 m³ (32,2%). Z pozostałych sortymentów drzewnych pozyskano 35,38 m³ (7,0%) typu S3, 17,81 m³ (3,5%) typu S4, 17,35 m³ (3,5%) typu S10 i 13,72 m³ (2,7%) typu M. W technologii ręczno-maszynowej zużycie paliwa w przeliczeniu na 1 m³ pozyskanego drewna kształtowało się na poziomie od 0,12 do 0,35 dm³ (tab. 1). Łącznie na pozyskanie 411,86 m³ drewna zużyto 92,84 dm³ paliwa. W przeliczeniu na pozyskanie 1 m³ drewna wynosi to przeciętnie 0,225 dm³. Wydajność godzinowa na jednego zatrudnionego zawierała się w przedziale od 0,47 do 2,83 m³. Średnia godzinowa wydajność pracy wynosiła natomiast 1,19 m³/robotnika (tab. 1). Na poszczególnych powierzchniach badawczych, gdzie stosowano technologię na poziomie ręczno-maszynowym, liczba osób zatrudnionych bezpośrednio przy pozyskaniu drewna wahała się od 2 do 5.

Cechą najbardziej skorelowaną ze zużyciem paliwa przypadającym na jednostkę pozyskanego drewna jest wydajność pracy (tab. 2). Współczynnik korelacji między tymi cechami wynosi –0,83. Zużycie paliwa jest także ujemnie skorelowane z typem zabiegu gospodarczego, miąższością drzewa i pierśnicą drzewa. Natomiast wydajność pracy jest dodatnio skorelowana z typem zabiegu gospodarczego, miąższością drzewa, pierśnicą drzewa i sortymentami wielkowymiarowymi (tab. 2). Zużycie paliwa dla zabiegów trzebieżowych wydaje się większe, a wydajność pracy mniejsza niż dla prac zrębowych. Aby to sprawdzić, przeprowadzono analizę wariancji zużycia paliwa ze względu na typ zabiegu gospodarczego (tab. 3). Wynika z niej, że badane zabiegi gospodarcze różnią się istotnie pod względem zużycia paliwa. Średnie zużycie paliwa podczas wykonywania zabiegów trzebieżowych nie wykazuje istotnych różnic, natomiast jest istotnie mniejsze przy zabiegach związanych z rębnią Ia (ryc. 1).

Ponieważ badane cechy są ze sobą skorelowane (tab. 2), zatem nie wszystkie muszą być brane pod uwagę przy opracowywaniu modelu zużycia paliwa. Okazało się, że zarówno zużycie paliwa (ZP), jak i wydajność pracy (WP) najlepiej opisane są przez miąższość drzewa (M),

Tabela 2.

Korelacje między wybranymi cech drzewostanu i wydajności pracy
Correlations of selected characteristics of stand and workload

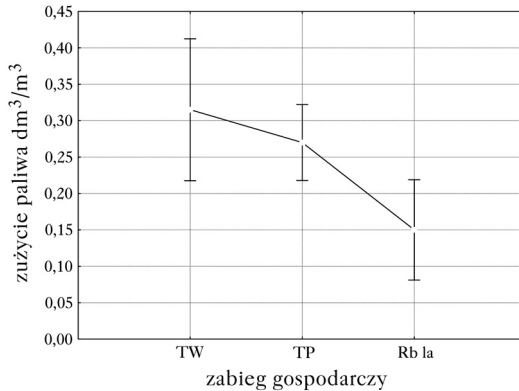
	Zużycie paliwa [dm ³ /m ³]	Wydaj. pracy [m ³ /h]	Miąższość drzewa [m ³]	Wiek drzewostanu [lata]	Wys. drzewa [m]	Pierśnica drzewa [cm]	Grupa S2, S3, S4, M [m ³]	Grupa WC, S10 [m ³]
Typ zabiegu gospodarczego	–0,73*	0,79*	0,37	0,50	0,17	0,46	–0,40	0,60*
Zużycie paliwa [dm ³ /m ³]	–	–0,83*	–0,55*	–0,33	–0,41	–0,62*	0,54	–0,50
Wydajność pracy [m ³ /h]		–	0,56*	0,36	0,33	0,64*	–0,53	0,78*
Miąższość drzewa [m ³]			–	0,62*	0,89*	0,95*	–0,53	0,59*
Wiek drzewostanu [lata]				–	0,60*	0,75*	–0,53	0,21
Wysokość drzewa [m]					–	0,86*	–0,72*	0,29
Pierśnica drzewa [cm]						–	–0,65*	0,59*
Grupa S2, S3, S4, M [m ³]							–	–0,23

* istotne na poziomie p=0,05; significant at p=0.05

Tabela 3.

Wpływ typu zabiegu gospodarczego na zużycie paliwa
Effect of treatment type on fuel consumption

	SS	Stopnie swobody	MS	F	p
Wyraz wolny	0,605052	1	0,605052	158,1835	0,000000
Typ zabiegu gosp.	0,049950	2	0,024975	6,5294	0,015340
Błąd	0,038250	10	0,003825		



Ryc. 1.

Średnie zużycie paliwa w poszczególnych typach zabiegów gospodarczych
Mean fuel consumption in individual treatments

wysokość drzewa (H) oraz ilość (masę) sortymentów drzewnych S2, S3, S4 i M oznaczoną jako (S). Biorąc to pod uwagę, otrzymano następujący model zużycia paliwa (współczynnik determinacji $R^2=0,62$):

$$ZP = -0,271727 - 0,611151 M + 0,031116 H + 0,006426 S \quad [1]$$

Dla wydajności pracy otrzymany model przyjął postać ($R^2=0,87$):

$$WP = 7,187715 + 6,522724 M - 0,358714 H - 0,062951 S \quad [2]$$

Uwagę zwraca ścisła korelacja liniowa istniejąca między zużyciem paliwa a wydajnością pracy przy pozyskaniu drewna wyrażona następującym modelem:

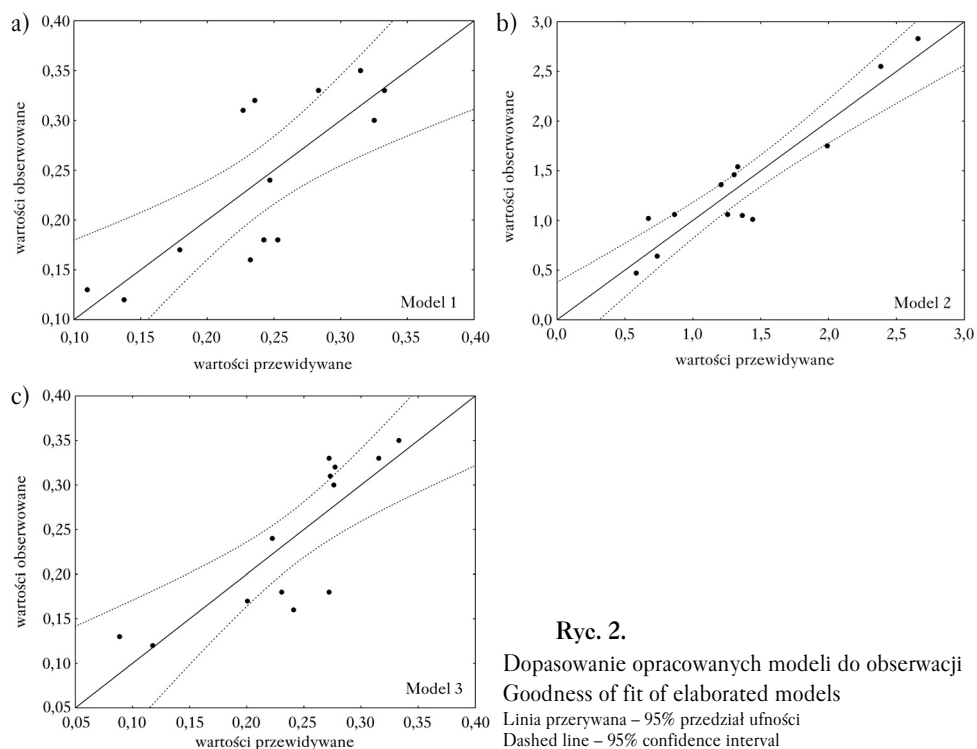
$$ZP = 0,38184 - 0,103591 WP \quad [3]$$

Współczynnik determinacji tego modelu wynosi $R^2=0,68$. Dopasowanie opracowanych modeli do obserwacji obrazuje rycina 2.

Dyskusja

Zaproponowane modele obrazujące zużycie paliwa przypadającego na jednostkę pozyskanego w lesie drewna oraz wydajność pracy są najlepiej opisywane przez przeciętną wysokość i przeciętną miąższość drzewa oraz cechę technologiczną, która charakteryzuje ilość (masę) pozyskanego drewna stosowego (S2, S4, M) i żerdzi (S3), a więc drewna o mniejszych wymiarach. Cechy zawarte w modelach wiążą się pośrednio z wiekiem i wysokością drzewa oraz typem zabiegu pielęgnacyjnego. Wysoka, ujemna korelacja wielkości zużycia paliwa na pozyskanie 1 m³ drewna i wydajności pracy potwierdza występowanie ścisłego i liniowo zależnego związku pomiędzy wydajnością przy pozyskaniu drewna i wielkością zużytego paliwa.

Wielość cech wpływających na zużycie paliwa i wydajność pracy oraz trudność ich zmierzenia negatywnie wpływa na precyzyjne określenie modelu opisującego to zjawisko.



Ryc. 2.

Dopasowanie opracowanych modeli do obserwacji
Goodness of fit of elaborated models

Linia przerywana – 95% przedział ufności
Dashed line – 95% confidence interval

Zdaniem Więsika i Wójcika [2007] ustalenie ilości paliwa przypadającego na pozyskanie drewna pilarką spalinową jest trudne, ze względu na jednoczesny wpływ parametrów pilarki, warunków skrawania i umiejętności operatora. Maciak [2007] uważa, że zmniejszenie powierzchni czynnej filtra powietrza w pilarce (w efekcie jego zanieczyszczenia) wpływa na wzrost zużycia paliwa. Więsik i Wójcik [2007] stwierdzili, że pilarki podobnej wielkości obsługiwane przez niedoświadczonego operatora zużywają nawet ponad 50% więcej paliwa niż obsługiwane przez robotnika z doświadczeniem. Natomiast jak podaje Stempski [2002], w zależności od rodzaju użytkowanych ogniw tnących piły łańcuchowej, pilarki osiągają różne wydajności, a największe różnice dochodziły nawet 15,35%. Ponieważ istnieje ścisły związek między wydajnością a zużyciem paliwa, więc można sądzić, że typ i stan zaostrenia łańcucha tnącego ma wpływ na zużycie paliwa. Spośród innych czynników, które także wywierają istotny wpływ na wielkość zużytego paliwa przy pozyskaniu drewna, a których nie rozpatrywano, należy wymienić także panujące warunki atmosferyczne (temperatura, wilgotność, ciśnienie) czy nawet przypadający na badania dzień tygodnia.

Wnioski

- ✦ W zaproponowanym modelu zużycia paliwa, podobnie jak w modelu obrazującym wydajność pracy przy pozyskaniu drewna, cechami najlepiej opisującymi zmienne zależne są: wysokość i miąższość drzewa oraz wielkość masy pozyskanych sortymentów S2, S4, M i S3.
- ✦ Zaproponowane modele mogą być wykorzystane do określenia zużycia paliwa przy pracach leśnych.
- ✦ Na dokładne określenie wielkości zużycia paliwa przy pozyskaniu drewna wpływ ma wiele czynników, które niekiedy są trudne do określenia i zwiarytowania.

Literatura

- Elandt R. 1964. Statystyka matematyczna w zastosowaniach do doświadczeń rolniczego. PWN, Warszawa.
- Gieffing F. D., Klentak I. 1999. Zużycie paliw w procesie pozyskiwania drewna w trzebieżach wczesnych drzewostanów sosnowych. W: Tendencje i problemy techniki leśnej w warunkach leśnictwa wielofunkcyjnego, Poznań, 25-31.
- Gieffing F. D., Mostefa M. 1994. Zużycie paliw w cięciach pielęgnacyjnych drzewostanów bukowych w zależności od technologii prac. Roczn. AR Pozn. 256: 32-48.
- Gieffing F. D., Tabaka P. 1993. Zużycie paliw i olejów w czyszczeniach późnych drzewostanów sosnowych w zależności od technologii prac. Prz. Tech. Rol. i Leśn. 3: 17-20.
- Jennrich R. I., Sampson P. F. 1968. Applications on stepwise regression to nonlinear estimation. *Technometrics* 10: 63-72.
- Kondracki J. 2002. Geografia regionalna Polski. PWN, Warszawa.
- Kusiak W. 2007. Program Gospodarczo-Ochronny dla Leśnego Kompleksu Promocyjnego Puszcza Notecka. RDLP Szczecin.
- Kusiak W. 2008. Tendencje na rynku harwesterów i forwarderów w Polsce. Bezpieczeństwo pracy w nowoczesnym leśnictwie. Katedra Inżynierii Środowiska Pracy, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu. 24-36.
- Kusiak W., Czechowski M. 2009. Ocena wielkości obciążenia środowiska emisją dwutlenku węgla przy maszynowym pozyskaniu i zrywce drewna. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych PAN* 543: 181-194.
- Laurow Z. 1994. Pozyskiwanie drewna. Wyd. SGGW, Warszawa.
- Leśnictwo. 2010. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa.
- Maciak A. 2007. Wpływ stopnia zanieczyszczenia filtra powietrza pilarki spalinowej na charakterystykę zewnętrzną silnika. *Techn. Rol. Ogr. Leśn.* 1: 16-18.
- Morrison D. F. 1990. Wielowymiarowa analiza statystyczna. PWN, Warszawa.
- PN-D-95000. 2002. Surowiec drzewny. Pomiar, obliczanie miąższości i cechowanie.
- Stemski W. 2002. Effect of the shape of the cutting link and cutting edge geometry on unit machining output of chipper chain saws. *Acta Scient. Pol. s Silv. Col. Ratio et Industria Lignaria* 1(2): 75-85.
- Więsik J. 1988. Analiza wykorzystania maszyn i zużycie paliwa w nadleśnictwach. *Sylvan* 132 (2): 9-19.
- Więsik J., Wójcik K. 2007. Zużycie paliwa przez pilarkę spalinową przy pozyskiwaniu drewna. *Pr. Kom. Nauk Roln., Leśn. i Wet.* 9: 265-274.

SUMMARY

Model of fuel consumption during harvesting of pine wood

Based on analysis of numerous stand and technological characteristics, mathematical models were determined to demonstrate the amount of fuel consumed during pine wood harvest. Characteristics that are most useful to describe this model are: average height, average volume as well as mass of harvested pile-type wood and mass of harvested rods. Enumerated characteristics are indirectly connected with tree age and height as well as with the type of conducted nursing treatment.

High negative correlation between fuel consumption for 1 cubic meter and efficiency of work done during wood harvesting confirms existence of exact and linearly dependent connection between those two characteristics. Model of fuel consumption amount during pine wood harvesting is very similar to the model demonstrating efficiency of work with reference to harvested wood. The proposed models can be used to determine fuel consumption during forest works, which can have significant practical meaning.