

## Struktura czasu pracy i wydajność maszyn podczas rozdrabniania karp

### Time usage and efficiency of machinery during stump crushing

Tomasz Gałęzia

Nadleśnictwo Głęboki Bród, Głęboki Bród 4, 16-506 Giby

Tel. + 48 87 5165203, fax: +48 87 5165231, e-mail: tomasz.galezia@bialystok.lasy.gov.pl

**Abstract.** This study was carried out at a roadside landing of the Augustów Forest District in order to determine the structure of a typical working day for machines involved in stump crushing as well as the overall efficiency of the process and the machinery's fuel consumption. The machines involved in the entire process were a front-loader, a shredder, a screen and a truck-tractor unit.

Machinery activity was recorded using a sampling method with a three-minute interval. During 16 hours of observation, 533 stumps were crushed to produce 362 m<sup>3</sup> lv of timber particles in total and the average operational productivity reached 28 m<sup>3</sup> lv h<sup>-1</sup>. Based on the amount of consumed fuel and its energy content, the energy input of the process was calculated to be 103.33 MJ m<sup>-3</sup> lv which is 3640.53 MJ m<sup>-3</sup> lv less than the output of energy gained at the power plant. Total CO<sub>2</sub> emissions of the processing machinery and transport off the forest site were estimated using previously published data and amounted to 7.58 kg m<sup>-3</sup> lv.

**Keywords:** stump, crushing, time, energy, efficiency

## 1. Wprowadzenie

Globalne ocieplenie wywiera istotny wpływ na zmianę klimatu Ziemi. Dalsze spalanie paliw kopalnych, w przypadku najbardziej negatywnego scenariusza (RCP 8.5), może doprowadzić do wzrostu temperatury powierzchni kuli ziemskiej w Europie o więcej niż 6°C w 2100 roku (IPCC 2014). W znaczący sposób wpłynie to na wszystkie ekosystemy oraz obszary działalności gospodarczej człowieka. Nawiązując do Porozumienia Paryskiego (COP 21) jest niezmiernie istotnym, aby nie tylko powstrzymać wzrost średniej temperatury Ziemi poniżej 2°C w stosunku do okresu preindustrialnego, ale wręcz ograniczyć ocieplenie do 1,5°C powyżej średniej temperatury sprzed okresu rewolucji przemysłowej.

Zastosowanie biomasy leśnej jako źródła energii jest jedną z alternatyw dla spalania tylko i wyłącznie paliw kopalnych, co może przyczynić się do redukcji emisji gazów cieplarnianych.

Poza drewnem opałowym i pozostałościami poeksploatacyjnymi gospodarki leśnej, karpiny drzew mogą stanowić wydajne źródło biomasy. W ostatnich latach ilość energii wytworzonej z karpiny rośnie, w szczególności w krajach skandynawskich – w 2012 roku w Finlandii około 1,1 mln m<sup>3</sup> rozdrobnionej

karpiny zostało zużytych w kotłowniach i elektrowniach (Ylitalo 2013).

Dotychczasowe badania dotyczące pozyskiwania karpiny na cele energetyczne prowadzono głównie w Europie Północnej (Laitila et al. 2008; Lazdins et al. 2009), chociaż jedne z pierwszych doświadczeń w zakresie technologii karczowania plantacji w celu uzyskania źródła energii przeprowadzono we Włoszech (Spinelli et al. 2005). Również w Stanach Zjednoczonych przeprowadzono doświadczenia w zakresie wydobywania karp z gleby, m. in. z zastosowaniem koparek z chwytakiem do wyburzania elementów konstrukcyjnych (Mitchell 2009) oraz wykorzystaniem mobilnych rozdrabniaczy do przetwarzania pozostałości zrębowych oraz całych drzew na zrębki energetyczne (Anderson et al. 2012). Wiele analiz dotyczy strony ekonomicznej pozyskiwania karp (Eriksson, Eliasson 2015; Eriksson et al. 2014; Laitila et al. 2015), ale badaniom poddawane były także zagadnienia natury ekologicznej i kwestie wpływu na środowisko (Moffat et al. 2011; Berg et al. 2015). Celem niniejszej pracy było określenie struktury dnia roboczego maszyn uczestniczących w procesie kruszenia karp, całkowitej wydajności tego procesu oraz zużycia paliwa (z uwzględnieniem transportu do elektrociepłowni) oraz bilans nakładów procesu pozyskiwania i efektów ze spalania tej biomasy w formie energii.

Wpłynęło: 31.03.2017 r., recenzowano: 8.08.2017 r., zaakceptowano: 20.10.2017 r.

## 2. Materiał i metody

Badania przeprowadzono na tymczasowej składnicy leśnej w Leśnictwie Żyliny (Nadleśnictwo Augustów). Karpy pochodziły z terenu przeznaczonego na poletka łowieckie, co spowodowało konieczność jego wykarczowania, po uprzednim usunięciu drzewostanu. Proces wydobywania karp z gleby przeprowadzony został przy pomocy koparki, a do ich przetransportowania z terenu poletka na składnicę wykorzystano ciągnik nasiębierny, lecz ten etap nie był analizowany w ramach niniejszych badań. Karpy ułożone były na przyzmacz o wysokości do dwóch metrów lub obok siebie, a okres przelegiwania wynosił 10 miesięcy.

Opis taksacyjny drzewostanu przed adaptacją wydzielenia na poletka łowieckie przedstawiono w tabeli 1.

Na powierzchni dokonano pomiaru średnic karp (w miejscu rzazu ścinającego) na próbie 100 sztuk (ryc. 1), zdejmowanych kolejno przez chwytak ciągnika siodłowego z różnych miejsc stosu.

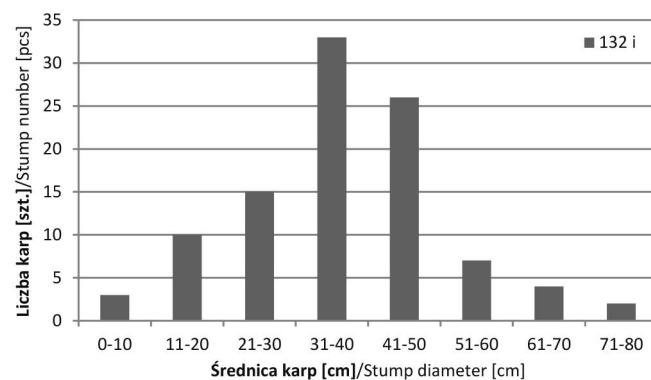
W proces rozdrabniania karp zaangażowane były cztery maszyny: ładowarka czołowa Doosan DL 250, jednowałowy rozdrabniacz wolnoobrotowy Doppstadt DW 3060, przesiewacz bębnowy Doppstadt SM 518 oraz ciągnik siodłowy MAN 27.463 wyposażony w manipulator hydrauliczny z chwytakiem.

Wszystkie maszyny pracowały jednocześnie, tworząc linię produkcyjną. Ładowarka czołowa wykonywała kilka zadań: przemieszczała karpy ze stosu w bezpośrednie pobliże ciągnika siodłowego, przemieszczała, a następnie ładowała rozdrobnione i przesiane zrębki na środki transportu, usuwała spod przesiewacza odseparowane zanieczyszczenia (głównie piasek) i plantowała ten materiał na terenie składnicy oraz zmieniała lokalizację rozdrabniacza i przesiewacza w obrębie składnicy. Zadaniem ciągnika siodłowego było ładowanie karp do rozdrabniacza oraz przemieszczanie rozdrabniacza i przesiewacza na większe odległości. Ponieważ rozdrabniacz i przesiewacz pracowały niemal przez cały czas w sposób zautomatyzowany, do obsługi procesu wystarczyły

dwie osoby – operator ładowarki i kierowca ciągnika siodłowego. W przypadku wszystkich maszyn pojawiła się kategoria czasu pod nazwą „przejazdy długodystansowe”. Jest to czas poświęcony na przemieszczanie maszyn ze składnicy do miejsca garażowania oraz pomiędzy różnymi składnicami w obrębie leśnictwa. Konieczność zaewidencjonowania tego czasu wynikała z chęci ukazania nakładów energii oraz czasu pracy generowanych przez sytuację, w której nie można pozostawić maszyn w terenie leśnym na noc z obawy przed kradzieżą paliwa i części, co także dodatkowo wpływało na wydłużenie czasu poświęconego na działania przygotowawcze-zakończeniowe oraz transport (holowanie) rozdrabniacza i sita przez ciągnik siodłowy.

Transport biomasy z lasu na składnicę przy elektrociepłowni w Białymstoku realizowany był na trasie o długości 172 km (w obie strony) pojazdami wywozowymi Scania R580 w dwóch kontenerach skrzyniowych o pojemności przeciętnie 36 m<sup>3</sup>(p) każdy.

Do określenia udziału poszczególnych czynności wykonywanych przez maszyny wykorzystano obserwacje migawkowe. Obserwacje prowadzono co 3 minuty przez pełne dwa



Rycina. 1. Liczba karp w przedziałach średnic na podstawie prób w miejscu rozdrabniania

Figure. 1. Number of stumps in diameter ranges based on a sample from the shredding site

Tabela. 1. Opis taksacyjny wydzielenia, z którego pochodziły rozdrabniane karpy

Table. 1. Stand characteristics of the source of stumps, before clear cutting

Lokalizacja Location	TSL Forest site type	Warstwa Layer	Udział, gatunek Share, species	Wiek Age	Zadrzewienie Stocking	Zwarcie Canopy density	Pierśnica DBH	Wysokość Height	Bonitacja Site Index	Jakość Quality	Grubizna na 1 ha Stand volume per 1 ha
Żyliny, 132i	BMw	drzew. main stand	4 Brz	89	0,8	przerywane / broken	28	27	I	2	129
			2 So	89			35	24	I.5	2	71
			2 Św	89			34	24	II.5	2	48
			2 Św	63			21	19	II	3	71
		podrost undergrowth	Św	23	0,1		6		22		
			1 Św	64		21	17	II.5	4	20	

Explanation: BMw – moist mixed coniferous forest, Brz – silver birch, So – Scots pine, Św – Norway spruce

dni robocze. Zastosowanie powyższego interwału czasowego pozwalało na precyzyjne określenie czynności wykonywanych kolejno przez wszystkie maszyny i dawało czas na dokonanie wpisu do raptularza terenowego przy zachowaniu dużej powtarzalności pomiarów (20 obserwacji w ciągu godziny). Zużycie paliwa określone zostało na podstawie odczytów z komputerów pokładowych maszyn, a emisję CO<sub>2</sub> obliczono na podstawie wartości zawartych w opracowaniu Ministerstwa Środowiska (Wartości opałowe..., 2015). Do określenia nakładu energetycznego zastosowano wydajność operacyjną ze względu na ograniczenie operacyjnego czasu pracy do czynności głównych oraz zmiany stanowiska pracy, czyli do tych elementów procesu, przy których występuje praca silników maszyn. Także obciążenie środowiskowe obliczono względem paliwa zużytego w czasie realizacji operacji głównych oraz zmiany położenia maszyny na terenie składnicy.

Aby uzyskać obraz rzeczywistej efektywności użytych maszyn leśnych określono bilans czasu ich pracy w oparciu o terminologię Krajowego Systemu Maszyn Leśnych (Botwin 1993). Współczynnik wykorzystania ogólnego czasu zmiany stanowił stosunek czasów głównych (np. rozdrabniania, przesiewania czy załadunku karp) do czasu całkowitego. Współczynnik wykorzystania czasu roboczego określał z kolei stosunek czasów głównych do sumy czasów głównych, czasu zmiany miejsca pracy w obrębie danej składnicy, czasu przygotowawczo-zakończeniowego (rozłożenie elementów maszyny, konfiguracja do rozpoczęcia pracy) oraz czasu poświęconego na naprawy sprzętu. Natomiast współczynnik wykorzystania czasu operacyjnego określony został jako stosunek czasów głównych do sumy czasów głównych i czasu zmiany miejsca pracy. Współczynnik pewności techniczno-technologicznej był ściśle związany z czasem strat z tytułu napraw (stosunek czasów głównych do sumy czasów głównych i czasu napraw), a współczynnik pewności obsługi technicznej – odpowiednio – z czasem przygotowawczo-zakończeniowym oraz czasem obsługi technicznej (regulacje maszyn, konfiguracje w trakcie pracy, tankowanie).

W celu obliczenia sumarycznego nakładu energetycznego oraz całkowitej emisji CO<sub>2</sub> procesu zostały uwzględnione nakłady i emisje generowane przez środki transportu, w oparciu o wcześniejsze badania prowadzone w Puszczy Augustowskiej (Gałęzia 2013a).

Zebrane wielkości nakładów energetycznych odniesiono do wartości energetycznej czterech reprezentatywnych próbek surowca pobieranych sukcesywnie (co 4 godziny) ze stosu zrębków za przesiewaczem. Próbkę poddano analizie pod kątem wartości opałowej, wilgotności całkowitej, zawartości popiołu oraz zawartości siarki.

### 3. Wyniki

W czasie prowadzonych pomiarów terenowych zaewidencjonowano ogółem 16 godz. i 6 min pracy kompletu maszyn. W tym czasie rozdrobniono 533 karpę uzyskując 362 m<sup>3</sup>(p) zrębków. Współczynnik zamienny liczby (sztuk) karp na

m<sup>3</sup>(p) wahał się od 0,54 do 0,77. Wydajność operacyjna całego procesu rozdrabniania karp wynosiła pomiędzy 33,95 szt. h<sup>-1</sup> a 37,62 szt. h<sup>-1</sup>.

Ponad połowę czasu pracy ładowarki czołowej stanowiło przemieszczanie karp w pobliże rozdrabniacza (ryc. 2), poprzez przenoszenie ich w łyżce lub (rzadziej) spychanie. Pozostałe zadania kwalifikowane do czasów głównych stanowiły: przemieszczanie i plantowanie ziemi odseparowanej w trakcie przesiewania zrębków, przemieszczanie oczyszczonych zrębków na oddzielny stos oraz załadunek zrębków na pojazdy wywozowe. Sumaryczny udział czasów głównych wyniósł 84%. Czteroprocentowy udział czasu przejazdów poza składnicę, na której odbywało się rozdrabnianie spowodowany był koniecznością prowadzenia załadunku zrębków przygotowanych wcześniej na innej składnicy, odległej o ponad kilometr.

Rozdrabniacz wolnoobrotowy prowadził tylko jedną operację główną – rozdrabnianie karp, która zajmowała 80% czasu jego pracy, podobnie jak w przypadku przesiewacza bębnowego, gdzie odseparowywanie zanieczyszczeń od zrębków zajmowało 81% czasu pracy. Obie maszyny pracowały w trybie automatycznym, w sposób ściśle ze sobą powiązany, stąd struktura czasu ich pracy jest niemalże bliźniacza.

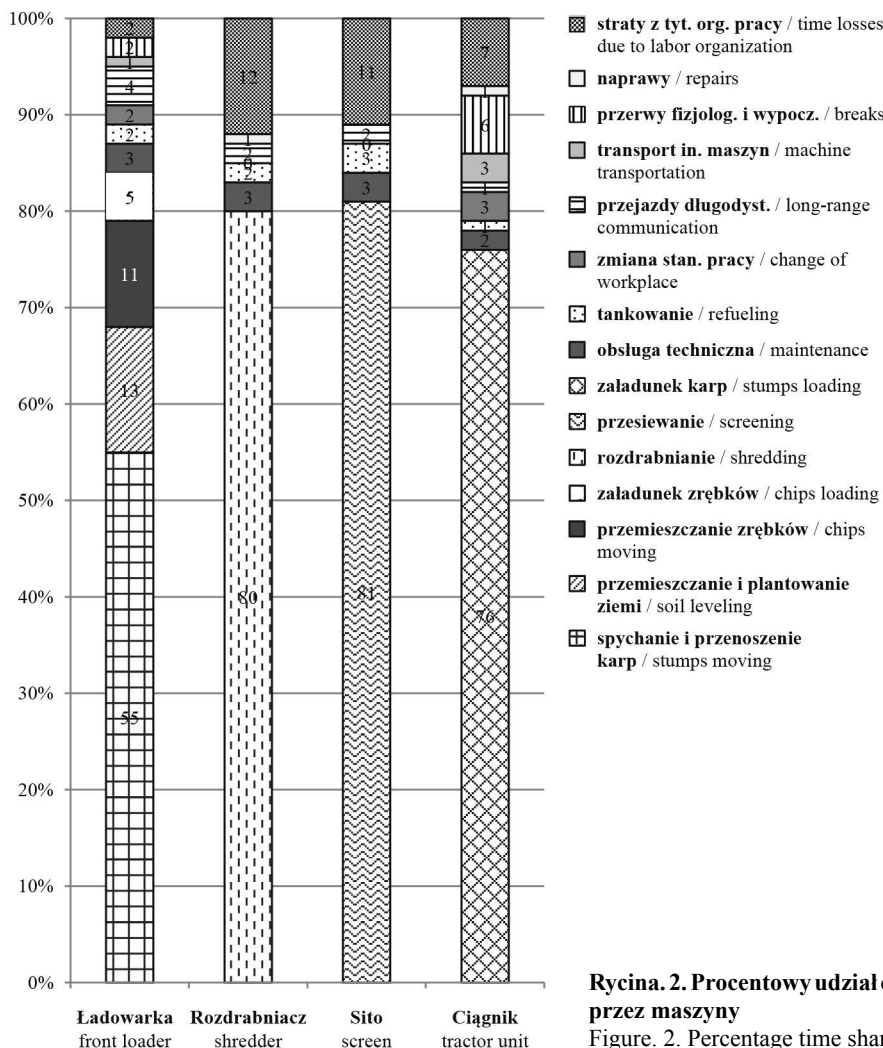
W strukturze czasu pracy ciągnika siodłowego wyposażonego w chwytak dominujący (76%) był udział operacji głównej (podawania karp do rozdrabniacza). Z powodu wykorzystania tego pojazdu do przemieszczania rozdrabniacza i przesiewacza między składnicami, 3% czasu zużyto na tę czynność.

W oparciu o dane uzyskane w trakcie pomiarów terenowych określono wybrane współczynniki wykorzystania czasu pracy oraz obliczono wydajność pracy bazując na metodyce podawanej przez Botwina (1993). Współczynnik wykorzystania czasu roboczego był nieznacznie niższy od współczynnika wykorzystania czasu operacyjnego ze względu na ujęcie w nim – oprócz czasu zmiany stanowiska pracy – także czasu napraw i czasu przygotowawczo-zakończeniowego.

Obliczono także nakłady energetyczne oraz emisje dwutlenku węgla generowane przez poszczególne maszyny (tab. 2).

Celem obliczenia sumarycznego nakładu energetycznego oraz całkowitej emisji CO<sub>2</sub> procesu uwzględniono nakłady i emisje generowane przez środki transportu. Nakład energetyczny maszyn pracujących na składnicy tj. 63,05 MJ m<sup>-3</sup>(p) został powiększony o wartość 40,28 MJ m<sup>-3</sup>(p), co w efekcie dało wynik 103,33 MJ m<sup>-3</sup>(p). Podobnie, w przypadku emisji CO<sub>2</sub>, określone emisje czterech maszyn 4,63 kg m<sup>-3</sup>(p) zwiększono o emisje powstające podczas transportu zrębków wynoszące 2,95 kg m<sup>-3</sup>(p) uzyskując w sumie 7,58 kg m<sup>-3</sup>(p).

Pobrane do analizy próbki pozwoliły na ocenę niektórych parametrów biomasy. Uśrednione wyniki czterech próbek rozdrobnionego surowca znajdującego się w stanie roboczym przedstawiały się następująco: wartość opałowa 15545,00 MJ t<sup>-1</sup>, wilgoć całkowita 13,30%, zawartość popiołu 9,79%, zawartość siarki 11,40%. Gęstość biomasy wynosiła przeciętnie 301,05 kg m<sup>-3</sup>(p), co przy uwzględnieniu sprawności bloku energetycznego wynoszącej 80% (Gałęzia 2013a) pozwoliło na uzyskanie efektu energetycznego równego 3743,86 MJ m<sup>-3</sup>(p).



Rycina. 2. Procentowy udział czasów poszczególnych operacji wykonywanych przez maszyny

Figure. 2. Percentage time share of operations performed by machinery

#### 4. Dyskusja

Pozyskiwanie biomasy energetycznej z karp wymaga zastosowania innych maszyn niż popularne już w Polsce systemy balotowania czy zrębkowania pozostałości zrębowych. O ile w skład zestawu zawsze wchodzić musi urządzenie do rozdrabniania karp, o tyle różne technologie prac pozwalają na zintegrowanie go z przesiewaczem (Laitila, Nuutinen 2013) albo zrezygnowanie z użycia separatora (Lazdins et al. 2009). Możliwe jest również agregatowanie w jedną maszynę rozdrabniacza i przesiewacza oraz zabudowanie ich na podwoziu ciągnika siodłowego wyposażonego w chwytak (Nuutinen et al. 2014), co przy właściwym przygotowaniu stosów karp pozwala na ograniczenie liczby operatorów do jednego.

Użycie nowoczesnego sprzętu, w formie częściowo zautomatyzowanej linii produkcyjnej, pozwoliło na uzyskanie bardzo wysokich wskaźników efektywności pracy. Współczynnik wykorzystania czasu operacyjnego wynosił dla poszczególnych maszyn od 0,96 do 1,00 co jest wynikiem zdecydowanie lepszym niż w przypadku systemu pozyskiwania balotów, gdzie współczynnik ten wahał się od 0,79 do 0,92 (Gałęzia 2013b). Także współczynnik pewności techniczno-technolo-

gicznej, pomimo zaistnienia konieczności przeprowadzania drobnych napraw (6 minut naprawy ciągnia podajnika w rozdrabniaczu i 12 minut na wymianę uszkodzonego przewodu hydraulicznego ciągnika siodłowego) świadczy o wysokiej jakości sprzętu i utrzymywaniu go przez operatorów we właściwej kondycji, co z kolei minimalizuje koszty napraw (wahające się średnio od 11,2 €/rg w przypadku forwardeków do 20,2 €/rg w przypadku harwesterów); trudno jednak odnaleźć korelację pomiędzy kosztami napraw a średnim rocznym czasem pracy takich maszyn (Holzleitner et al. 2011).

Uzyskana w niniejszych badaniach wydajność operacyjna poszczególnych maszyn jest zbliżona, a współczynnik pewności techniczno-technologicznej bliski 1,00, co pozwala określić wydajność całego systemu na 28 m<sup>3</sup>(p) h<sup>-1</sup>. Jest to wydajność czterokrotnie mniejsza niż w przypadku maszyny w pełni zintegrowanej Crambo 6000 (Laitila, Nuutinen 2013) i dwukrotnie mniejsza niż w przypadku rozdrabniacza szybkoobrotowego CBI 5800 (Nuutinen et al. 2014). W przypadku procesu rozdrabniania karp kruszarkami stacjonarnymi na terminalu wydajność jest o około 15% większa (10 t s.m. h<sup>-1</sup>) (Lazdins et al. 2009). Przyczyny niskiej wydajności można upatrywać w relatywnie dużym udziale

**Tabela. 2. Współczynniki wykorzystania czasu pracy, wydajność pracy, nakład energetyczny i emisja CO<sub>2</sub> w procesie rozdrabniania karp**

Table. 2. Coefficients of time use, labor efficiency, energy input and carbon dioxide emissions during stump crushing

Charakterystyka efektywności Characteristics of efficiency	Ładowarka czołowa Front loader	Rozdrabniacz Shredder	Przesiewacz Screen	Ciągnik siodłowy Tractor unit
<b>Współczynnik wykorzystania ogólnego czasu zmiany</b> General work shift time use coefficient	0,85	0,80	0,81	0,76
<b>Współczynnik wykorzystania czasu roboczego</b> Working time use coefficient	0,95	0,96	0,96	0,93
<b>Współczynnik wykorzystania czasu operacyjnego</b> Operational time use coefficient	0,98	1,00	1,00	0,96
<b>Współczynnik pewności techniczno-technologicznej</b> Technical-technological robustness coefficient	1,00	0,99	1,00	0,98
<b>Współczynnik pewności obsługi technicznej</b> Technical maintenance robustness coefficient	0,95	0,94	0,93	0,96
<b>Wydajność operacyjna [m<sup>3</sup>(p) h<sup>-1</sup>]</b> Operational productivity [m <sup>3</sup> lv h <sup>-1</sup> ]	27,42	28,50	28,28	28,50
<b>Wydajność robocza [m<sup>3</sup>(p) h<sup>-1</sup>]</b> Working productivity [m <sup>3</sup> lv h <sup>-1</sup> ]	26,81	27,53	27,32	27,63
<b>Wydajność eksploatacyjna [m<sup>3</sup>(p) h<sup>-1</sup>]</b> Exploitation productivity [m <sup>3</sup> lv h <sup>-1</sup> ]	23,13	22,98	23,06	22,41
<b>Nakład energetyczny [MJ m<sup>-3</sup>(p)]</b> Energy input [MJ m <sup>-3</sup> (p)]	13,24	31,74	6,35	11,72
<b>Emisja CO<sub>2</sub> [kg m<sup>-3</sup>(p)]</b> CO <sub>2</sub> emission [kg m <sup>-3</sup> (p)]	0,97	2,33	0,47	0,86

strat czasu spowodowanych organizacją pracy, co wynikało z wielofunkcyjności ładowarki czołowej. Konieczność załadunku pojazdów wywozowych (również na składnicy innej niż ta, na której odbywało się rozdrabnianie) miało wpływ na udział przejazdów długodystansowych w rozmiarze większym niż dla innych maszyn. Powodowało to przestoje całej linii produkcyjnej i miało zauważalny wpływ na wydajność procesu.

Pomimo, że obserwacje wykazały wydajność przesiewacza na nieco niższym poziomie (o 0,22 m<sup>3</sup>(p) h<sup>-1</sup>) niż rozdrabniacza wolnoobrotowego, nie zanotowano sytuacji, w której przesiewacz przyczyniał się do strat czasu pracy. Jego zastosowanie powodowało wprawdzie wzrost nakładów energetycznych o ok. 6%, jednak wpływało również na poprawę jakości wytwarzanego produktu. Przesiewanie na składnicy ma też korzystny wpływ na efektywność transportu zrębków, redukując ich masę o udział odseparowanych zanieczyszczeń (Eriksson, Eliasson 2015).

Uzyskane wyniki pomiaru parametrów biomasy różnią się od pomiarów publikowanych przez innych badaczy. Laurila i Lauhanen (2010) uzyskali zawartość popiołu na poziomie 1,7% dla karp przelegujących 36 miesięcy, a Laitila i Nuutinen (2015) – pomiędzy 1 a 1,5% dla karp przelegujących od

10 do 20 miesięcy; są to wyniki znacznie niższe niż uzyskane w Puszczy Augustowskiej (9,79%). Wynika to jednak z tego, że w przypadkach tych badań analizowano czyste drewno z pni, podczas gdy w zrębkach z karpiny uzyskano już zdecydowanie wyższą zawartość popiołu – 12,9% (Nuutinen et al. 2014), a nawet 14% (Alakangas 2000). Wartość opałowa drewna ze świerkowych karp pozyskanych w zachodniej Finlandii po okresie trzyletniego składowania wynosiła 5680 MJ m<sup>-3</sup>(p) (Laurila, Lauhanen 2010), czyli o 1000 MJ m<sup>-3</sup>(p) więcej niż w przypadku Nadleśnictwa Augustów, jednak zrębki z karp świerkowych (Nuutinen et al. 2014) miały wartość opałową bliską tej uzyskanej w Polsce (16,4 MJ kg<sup>-1</sup> względem 15,5 MJ kg<sup>-1</sup>). Wyższy wynik uzyskali Bergström i Matisons dla karp z gleb mineralnych (od 17,1 do 17,9 MJ kg<sup>-1</sup>), jednak znacznie niższą wartością opałową, tj. 14,3 MJ kg<sup>-1</sup>, charakteryzowały się karpy pozyskiwane na gruntach podmokłych (Forest refine... 2014).

Różnice w zawartości popiołu i wartości opałowej mogą być generowane nie tylko przez odmienny skład gatunkowy karp, ale również przez okres ich ekspozycji na czynniki atmosferyczne, w szczególności na opady deszczu, które wspomagają opłukiwanie karp z zanieczyszczeń mineralnych, a przez to mogą zmniejszyć ryzyko uszkodzenia roz-

drabniaczy i spadku wydajności kotłów (Otepa 2013). Na biomase ma również wpływ wilgotność względna powietrza, szczególnie w klimacie Północnej Europy, gdzie obserwuje się znaczną korelację zmian wilgotności drewna wraz ze zmianami pór roku (Laurila, Lauhanen 2010).

## 5. Wnioski

Badania wykazały, że karpy mogą być efektywnym źródłem biomasy energetycznej. Pomimo zaangażowania w proces produkcyjny szeregu maszyn, działalność ta jest uzasadniona pod względem bilansu energetycznego. Rozdrabniacz wolnobrotowy oraz przesiewacz charakteryzują się dużą niezawodnością, a wytworzony surowiec – wartością energetyczną zbliżoną do drewna opałowego.

## Konflikt interesów

Autor deklaruje brak potencjalnych konfliktów.

## Podziękowania i źródła finansowania

Badania sfinansowano ze środków własnych. Dziękuję Nadleśnictwu Augustów za zgodę na przeprowadzenie badań i wykorzystanie danych źródłowych.

## Literatura

- Alakangas E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia [Właściwości paliw używanych w Finlandii]. Technical Research Centre of Finland, VTT Research Notes 2045: 1–189.
- Anderson N., Chung W., Loeffler D., Jones J.G. 2012. Productivity and cost comparison of two systems for producing biomass fuel from roadside forest treatment residues. *Forest Products Journal* 62(3): 222–233. DOI 10.13073/0015-7473-62.3.222.
- Berg S., Bergström D., Nordfjell T. 2015 Effect of stump size and timing of stump harvesting on ground disturbance and root breakage diameter. *Silva Fennica* 49(5): 1–17. DOI 10.14214/sf.1312.
- Bergström D., Matisons M. (ed.) 2014. Forest Refine, 2012–2014 : efficient forest biomass supply chain management for biorefineries: synthesis report. Umeå, SLU, Uppsala, 1–113.
- Botwin M. 1993. Podstawy użytkowania maszyn leśnych, Warszawa, Wydawnictwo SGGW, 120 s. ISBN 83-00-02777-7.
- Eriksson A., Eliasson L. 2015. Analyzing machine concepts and delivery strategies to cut delivery costs for forest fuels using a discrete-event simulation model. Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference, 3194–3195. ISSN 1558-4305.
- Eriksson A., Eliasson L., Hansson P.-A., Jirjis R. 2014. Effects of supply chain strategy on stump fuel cost: a simulation approach. *International Journal of Forestry Research* 2014, article ID 984395: 1–11. DOI 10.1155/2014/984395.
- Gałęzia T. 2013a. Bilans energetyczny oraz czasochłonność wybranych elementów w łańcuchu technologicznym pozyskiwania biomasy leśnej. *Sylwan* 157(6): 419–424.
- Gałęzia T. 2013b: Analiza efektywności wybranych metod pozyskiwania biomasy leśnej na cele energetyczne na przykładzie Puszczy Augustowskiej, w: Biomasa leśna na cele energetyczne. Instytut Badawczy Leśnictwa. Sękocin Stary, 127–137. ISBN 978-83-62830-18-3.
- Holzleitner F., Stampfer K., Visser R. 2011. Utilization rates and cost factors in timber harvesting based on long-term machine data. *Croatian Journal of Forest Engineering* 32(2): 501–508.
- IPCC. 2014. Summary for Policymakers, in: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: 1–32. ISBN 978-92-9169-143-2.
- Laitila J., Nuutinen Y. 2013. Efficiency of integrated grinding and screening of stump wood for fuel at roadside landing with a Crambo 6000 grinder equipped with a star screen. Demo Report 4: Innovative and effective technology and logistics for forest residual biomass supply in the EU: 1–11.
- Laitila J., Nuutinen Y. 2015. Efficiency of integrated grinding and screening of stump wood for fuel at roadside landing with a low-speed double-shaft Grinder and a star screen. *Croatian Journal of Forest Engineering* 36(1): 19–32.
- Laitila J., Ranta T., Asikainen A. 2008. Productivity of stump harvesting for fuel. *International Journal of Forest Engineering* 19(2): 37–47.
- Laitila J., Ranta T., Asikainen A., Jäppinen E., Korpinen O.-J. 2015. The cost competitiveness of conifer stumps in the procurement of forest chips for fuel in Southern and Northern Finland. *Silva Fennica* 49(2): 1–23. DOI 10.14214/sf.1280.
- Laurila J., Lauhanen R. 2010. Moisture content of Norway spruce stump wood at clear cutting areas and roadside storage sites. *Silva Fennica* 44(3): 427–434. DOI 10.14214/sf.140.
- Lazdinš A., Von Hofsten H., Lazdina D., Lazdans L. 2009. Productivity and costs of stump harvesting for bioenergy production in Latvian conditions. Proceedings of 8th International Scientific Conference “Engineering for rural development”, Jelgava, 28-29.05.2009: 194–201. ISSN 1691-5976.
- Mitchell D. 2009. Stump harvesting. Council on Forest Engineering (COFE) Conference Proceedings: “Environmentally Sound Forest Operations”. Lake Tahoe, June 15-18, 2009: 1–6.
- Moffat A., Nisbet T., Nicoll B. 2011. Environmental effects of stump and root harvesting. Forestry Commission Research Note (FCRN009). Forestry Commission, Edinburgh. ISBN 978-0-85538-847-8.
- Nuutinen Y., Laitila J., Rytönen E. 2014. Grinding of stumps, logging residues and small diameter wood using a CBI 5800 grinder with a truck as a base machine (brief report). *Baltic Forestry* 20(1): 176–188.
- Otepa P. (ed.) 2013. Guidebook on local bioenergy supply based on woody biomass. Scientific & Academic Publishing, Rosemead, 1–145. ISBN 978-1-938681-99-8.
- Spinelli R., Nati C., Magagnotti N. 2005. Harvesting and transport of root biomass from fast-growing poplar plantations. *Silva Fennica* 39(4): 539–548. DOI 10.14214/sf.365.
- Wartości opałowe (WO) i wskaźniki emisji CO<sub>2</sub> (WE) w roku 2013 do raportowania w ramach Wspólnotowego Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji za rok 2016, 2015: Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy. Warszawa.
- Ylitalo E. 2013. Puun energiakäyttö 2012 [Konsumpcja drewna w produkcji energii w roku 2012]. *Metsätalustietodote* 15: 1–7.

## Time usage and efficiency of machinery during stump crushing

Tomasz Gałęzia

Głęboki Bród Forest District, Głęboki Bród 4, 16–506 Giby, Poland

Tel. + 48 87 5165203, fax: +48 87 5165231, email: [tomasz.galezia@bialystok.lasy.gov.pl](mailto:tomasz.galezia@bialystok.lasy.gov.pl)

**Abstract.** This study was carried out at a roadside landing of the Augustów Forest District in order to determine the structure of a typical working day for machines involved in stump crushing as well as the overall efficiency of the process and the machinery's fuel consumption. The machines involved in the entire process were a front-loader, a shredder, a screen and a truck-tractor unit.

Machinery activity was recorded using a sampling method with a three-minute interval. During 16 hours of observation, 533 stumps were crushed to produce 362 m<sup>3</sup> lv of timber particles in total and the average operational productivity reached 28 m<sup>3</sup> lv h<sup>-1</sup>. Based on the amount of consumed fuel and its energy content, the energy input of the process was calculated to be 103.33 MJ m<sup>-3</sup> lv which is 3640.53 MJ m<sup>-3</sup> lv less than the output of energy gained at the power plant. Total CO<sub>2</sub> emissions of the processing machinery and transport off the forest site were estimated using previously published data and amounted to 7.58 kg m<sup>-3</sup> lv.

**Keywords:** stump, crushing, time, energy, efficiency

### 1. Introduction

Global warming has a significant impact on climate change. Further, in the case of the most negative scenario (RCP 8.5), fossil fuel combustion could lead to an increase in the temperature of the Earth's surface, increasing the temperature in Europe by more than 6 °C in 2100 (IPCC 2014). This will significantly affect all ecosystems and areas of human economic activity. In reference to the Paris Agreement (COP 21), it is extremely important not only to stop the increase in the mean temperature of the Earth to under 2 °C as compared to the pre-industrial period, but also to actually limit the warming to 1.5 °C above the pre-industrial average.

The use of forest biomass as a source of energy is one of the alternatives to burning the fossil fuels, which may contribute to reducing the emission of greenhouse gases. Apart from firewood and the logging residues, tree stumps can provide an efficient source of biomass. In recent years, the amount of stump-generated energy has increased, especially in the Scandinavian countries – in Finland, about 1.1 million m<sup>3</sup> of shredded stump is used in boilers and power plants (Ylitalo 2013).

Previous studies on using stumps for energy purposes were conducted mainly in the northern Europe (Laitila et al. 2008, Lazdins et al. 2009), although one of the first experiments in the technology of root recovery to obtain a source of energy was carried out in Italy (Spinelli et al. 2005). Experiments have also been conducted in the USA on extracting stumps from soil, among others, using excavators equipped with grapples designed for construction demolishing (Mitchell 2009) and mobile shredders to process logging residues and whole trees for energy chips (Anderson et al., 2012). Many analyses have been conducted on the economy of using stumps (Eriksson, Eliasson 2015; Eriksson et al. 2014; Laitila et al. 2015), but the studies also considered issues of an ecology and the environmental impact of such activities (Moffat et al. 2011; Berg et al. 2015).

The purpose of this study was to determine the working day structure of the machines involved in the stump crushing process, the total efficiency of this process, and the fuel consumption (including transport to a combined heat and power – CHP – plant), as well as the balance between the input needed for the logging process and the energy output of burning this biomass.

Received: 31.03.2017, reviewed: 08.08.2017, accepted: 20.10.2017

## 2. Materials and methods

The research was carried out at a temporary roadside landing in the Żyliny Forest District (Augustów Forest Inspectorate). The stumps were extracted from clear-cuts intended to become wildlife food plots, which required the area to be grubbed up after removing the stand. The stumps were removed from the ground by an excavator and transported from the plots to the landing by a forwarder; however, this stage was not part of the analysis of the present study. The stumps were stacked up to two meters high or laid side by side and seasoned for a period of 10 months.

The characteristics of the stand before the area was adapted for game plot are presented in Table 1.

The diameter (in the place of a felling cut) of a sample of 100 stumps was measured (Figure 1), with each stump successively removed by a tractor's grapple from various locations in the stack.

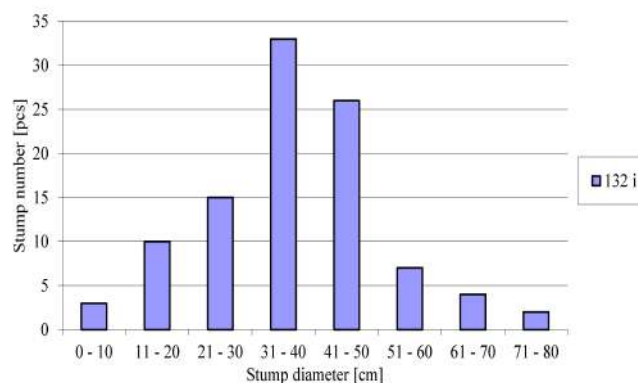
There were four machines involved in the stump shredding process: the Doosan DL 250 wheel loader, the Doppstadt DW 3060 slow speed shredder, the Doppstadt SM 518 single-drum screen and the MAN 27.463 tractor equipped with a hydraulic manipulator with a grapple.

All machines were operating at the same time, forming a production line. The wheel loader performed several tasks: moving the stump from the stack to the nearby tractor unit, moving and then loading the shredded and sifted chips to the transport means, removing the dirt from under the screen (mostly sand) and levelling the material at the landing, as well as changing the location of the shredder and screen at the landing. The task of the tractor unit was to load the stump into the shredder and to move the shredder and screen over long distances. As the shredder and screen were working almost all the time in an automated way, two persons – the

drivers of the wheel loader and the tractor unit – sufficed to handle the process. All machines had a time category called the 'long-distance travel'. This is the time spent moving the machines from the landing to the garage and between the various roadside landings within the forest district. The necessity of recording this time was due to the desire to show the amount of energy and working time expended, when it was not possible to leave the machines in the forest for the night because of the fear of fuel and parts being stolen, which also prolonged the time spent on preparatory and completion activities, as well as hauling the shredder and screen by the tractor.

The biomass from the forest to the storage area at the CHP plant in Białystok was transported over a 172 km (two-way) route with the Scania R580 trucks hauling two containers with an average capacity of 36 m<sup>3</sup>lv each.

Snapshot observations were used to determine the contribution of each machine activity. Observations were made



**Figure 1.** Number of stumps in diameter ranges based on the sample from the shredding site

**Table 1.** Stand characteristics of the source of stumps, before clear cutting

Location	Forest site type	Layer	Share, species	Age	Stocking	Canopy density	DBH	Height	Site Index	Quality	Stand volume per 1 ha
Żyliny, 132i	BMw	main stand	4 Brz	89	0.8	broken	28	27	I	2	129
			2 So	89			35	24	I.5	2	71
			2 Św	89			34	24	II.5	2	48
			2 Św	63			21	19	II	3	71
		undergrowth	Św	23	0.1		6	22			
			1 Św	64		21	17	II.5	4	20	

Explanation: BMw – moist mixed coniferous forest, Brz – silver birch, So – Scots pine, Św – Norway spruce

every 3 minutes for two full working days. Applying this time interval allowed a precise determination of the actions performed successively by all the machines and provided the time to make the entry in the field recorder while maintaining a high repeatability of the measurements (20 observations per hour). Fuel consumption was determined from the readings of the machines' onboard computers and CO<sub>2</sub> emissions were calculated on the basis of the values contained in the publication of the Ministry of the Environment (Fuel values..., 2015). Operational efficiency was selected to estimate the energy input because this kind of efficiency category includes those activities of a working day in which engines are running. Also, the environmental impact was calculated based on the fuel consumed during the main operations and changing the location of the machines at the roadside landing.

In order to obtain an image of the actual efficiency of the forestry machines used, the balance of their operating time was calculated based on the terminology of the National Forest Machinery System (Botwin 1993). The coefficient of general work shift time use was the ratio of the main times (e.g., shredding, sieving or stump loading) to the total time. The coefficient of working time use determined the ratio of the main times to the sum of the main times, change in the work site within a given roadside landing, preparation-completion time (setting up elements of the machines, the configuration to start work) and the time spent repairing equipment. The coefficient of operational time use is defined as the ratio of the main times to the sum of the main times and the time required to change the work site. The technical-technological robustness coefficient was directly related to the time needed for repairs (the ratio of main times to the sum of main times and repair times), and the technical maintenance robustness coefficient – respectively – with preparation-completion time and maintenance time (regulating machines, configuration during work and refuelling).

Input and emissions generated by transport vehicles, based on previous research conducted in the Augustów Forest (Gałęzia 2013a), were used to calculate the sum of energy input and the total CO<sub>2</sub> emissions.

The amount of energy input was compared with the energy values of the four representative samples of the raw material, taken successively (every 4 hours) from the stack of wood chips behind the screen. Samples were analysed for calorific value, total moisture content, ash content and sulphur content.

### 3. Results

A total of 16 hours and 6 minutes of work conducted by the set of machines was recorded. During this time, 533 stumps were crushed to obtain 362 m<sup>3</sup>lv of wood chips. The

replacement coefficient of the number (pieces) of stumps per m<sup>3</sup>lv ranged from 0.54 to 0.77. The operating efficiency of the whole stump crushing process was between 33.95 pcs h<sup>-1</sup> and 37.62 pcs h<sup>-1</sup>.

More than half of the wheel loader's time was used to move the stumps near the shredder (Figure 2), by moving them in the bucket or (less often) by pushing them. Other tasks qualified as the main times were: moving and levelling the soil separated from the chips during screening, transferring the sifted wood chips to a separate pile and loading the wood chips onto the container trucks for transport. The aggregate share of main times was 84%. The 4% share of the long-distance travel was due to the need to transport chips prepared earlier at a different roadside landing distant more than one kilometre away from the current workplace.

The low speed rotary shredder had only one main operation – shredding the stumps, which occupied 80% of its working time, as was in the case of the drum screen, where the separation of debris from the chips took 81% of the working time. Both machines worked in automatic mode, closely linked, so the structure of their working time was almost identical.

In the structure of the working time of the tractor equipped with a grapple, the main operation of feeding stumps to the shredder dominated (76%). 3% of this vehicle's working time was spent moving the shredder and screen between landings.

Based on the data obtained during field measurements, the selected working time coefficients were determined and labour productivity was calculated based on the methods provided by Botwin (1993). The working time use coefficient was slightly lower than the operational time use coefficient because it includes not only the time for changing a work place, but also the time taken for repairs and preparation and completion.

Energy input and carbon dioxide emissions generated by individual machines were also calculated (Table 2).

In order to calculate the total energy input and the total CO<sub>2</sub> emission of the process, the input and emissions generated by the means of transport were taken into account. The energy input of the machines operating at the roadside landing, that is, 63.05 MJ m<sup>-3</sup>lv, was increased by 40.28 MJ m<sup>-3</sup>lv, resulting in 103.33 MJ m<sup>-3</sup>lv. Similarly, in the case of CO<sub>2</sub> emissions, the specific emissions of four machines at 4.63 kg m<sup>-3</sup>lv were increased by emissions of 2.95 kg m<sup>-3</sup>lv resulting from the transport of chips, to yield a total of 7.58 kg m<sup>-3</sup>lv.

The samples of chips taken for analysis allowed certain biomass parameters to be assessed. The average results of four samples of shredded raw material in its working condition were as follows: calorific value 15545.00 MJ t<sup>-1</sup>, total moisture 13.30%, ash content 9.79%, sulphur content 11.40%. The biomass density was an average of 301.05 kg m<sup>-3</sup>lv, which when considering the efficiency of the power

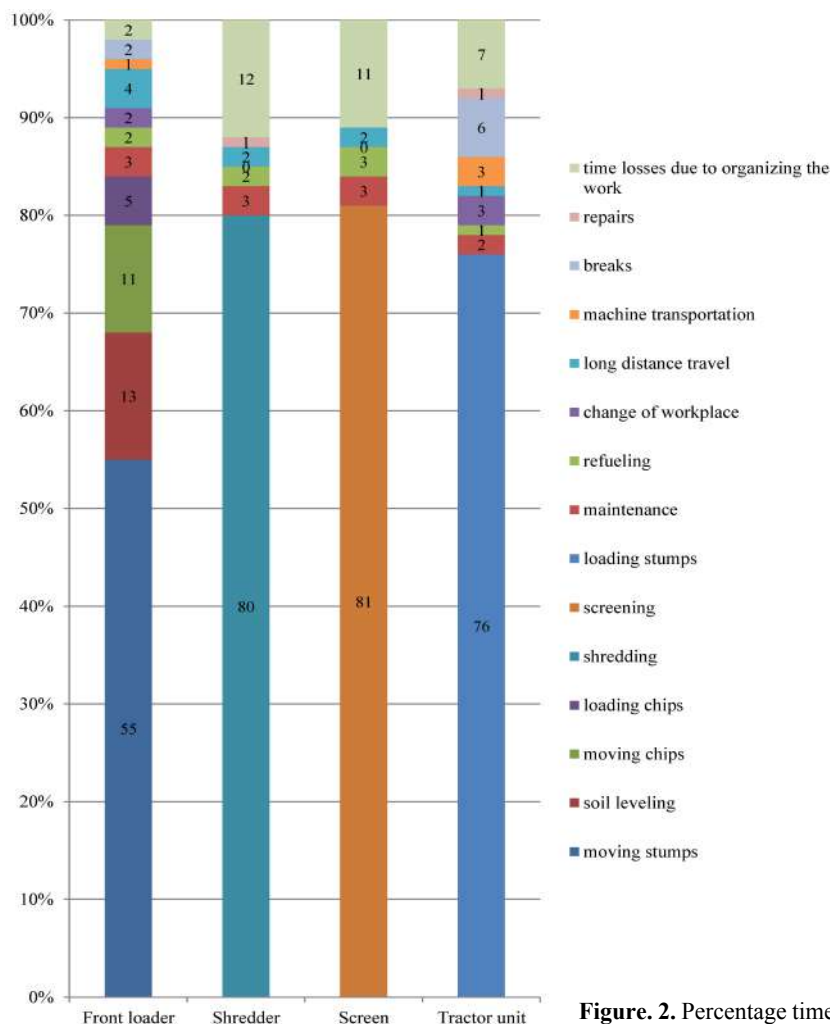


Figure 2. Percentage time share of operations performed by machinery

plant at 80% (Gałęzia 2013a), provided an energy effect of 3743.86 MJ m<sup>-3</sup>lv.

#### 4. Discussion

Obtaining biomass from stumps requires the use of machines other than the already popular systems in Poland of slash-bundling or chipping logging residues. Insofar as the set of machines always has to include one to crush stumps, various other technologies allow it to be integrated with a screen (Laitila, Nuutinen 2013) or to resign from using a separator (Lazdins et al. 2009). It is also possible to aggregate a single shredder and screen into one machine and mount them on the chassis of a tractor equipped with a gripper (Nuutinen et al., 2014), which, with a properly prepared stack of stumps, allows the number of operators to be reduced to one.

The use of modern equipment, in the form of a partially automated production line, allowed very high-performance coefficients to be achieved. The operational time use coefficient ranged from 0.96 to 1.00 for individual machines, which is significantly better than slash-bundling system, which had the coefficient varying from 0.79 to 0.92 (Gałęzia 2013b). Also, the technical-technological robustness coefficient, despite the need for minor repairs (6 minutes to repair a feeder cable in the shredder and 12 minutes to replace a broken hydraulic hose in the tractor), demonstrates the high quality of the equipment and the fact that the operators maintain it in proper condition, which in turn minimizes repair costs (ranging from € 11.2 mh<sup>-1</sup> for forwarders to € 20.2 mh<sup>-1</sup> for harvesters); however, it is difficult to find a correlation between repair costs and the average annual working time of such machines (Holzleitner et al. 2011).

**Table 2.** Coefficients of time use, labor efficiency, energy input and carbon dioxide emissions during stump crushing

Characteristics of efficiency	Front loader	Shredder	Screen	Tractor unit
General work shift time use coefficient	0.85	0.80	0.81	0.76
Working time use coefficient	0.95	0.96	0.96	0.93
Operational time use coefficient	0.98	1.00	1.00	0.96
Technical-technological robustness coefficient	1.00	0.99	1.00	0.98
Technical maintenance robustness coefficient	0.95	0.94	0.93	0.96
Operational productivity [ $\text{m}^3 \text{lv h}^{-1}$ ]	27.42	28.50	28.28	28.50
Working productivity [ $\text{m}^3 \text{lv h}^{-1}$ ]	26.81	27.53	27.32	27.63
Exploitation productivity [ $\text{m}^3 \text{lv h}^{-1}$ ]	23.13	22.98	23.06	22.41
Energy input [ $\text{MJ m}^{-3}(\text{p})$ ]	13.24	31.74	6.35	11.72
CO <sub>2</sub> emission [ $\text{kg m}^{-3}(\text{p})$ ]	0.97	2.33	0.47	0.86

The values of the operational productivity of individual machines obtained in this study are similar and the technical-technological robustness coefficient is close to 1.00, which allows us to determine the overall system efficiency at  $28 \text{ m}^3 \text{lv h}^{-1}$ . This is four times less than the fully integrated Crambo 6000 machine (Laitila, Nuutinen 2013) and two times less than a CBI 5800 quick rotary shredder (Nuutinen et al., 2014). In the case of crushing stumps with stationary grinders at the terminal, their efficiency is about 15% higher ( $10 \text{ t d. m. h}^{-1}$ ) (Lazdins et al. 2009). The reason for this low productivity can be the relatively large share of time lost in organising the work, which was due to the multi-functionality of the wheel loader. The need to load the transport vehicles (also in a landing other than the one where the shredding took place) affected the share of long-distance travel to a greater degree than for the other machines. This resulted in downtime across the production line and had a noticeable effect on the efficiency of the process.

Although the observations have shown that the efficiency of the screen is slightly lower ( $0.22 \text{ m}^3 \text{lv h}^{-1}$ ) than that of the shredder, there was no record of a situation where the screen caused a loss of work time. While its use in fact led to an increase in energy input by about 6%, it also contributed to the improved quality of the product produced. Sieving at the roadside landing also has a positive effect on the efficiency of transporting the wood chips, reducing their mass by the proportion of the separated debris (Eriksson, Eliasson 2015).

The obtained results of the biomass parameter measurements differ from those published by other researchers. Laurila and Lauhanen (2010) obtained an ash content at 1.7% for stumps that had seasoned for 36 months, while Laitila and Nuutinen

(2015) – between 1 and 1.5% for stumps seasoned from 10 to 20 months. These results are much lower than those obtained in the Augustów Forest (9.79%). This is because those studies analysed clean wood from tree trunks, whereas the chips from the stumps had a significantly higher ash content – 12.9% (Nuutinen et al., 2014) and even 14% (Alakangas 2000). The calorific value of the wood from spruce stumps harvested in Western Finland after a three year storage period was  $5680 \text{ MJ m}^{-3} \text{lv}$  (Laurila, Lauhanen 2010), which is  $1000 \text{ MJ m}^{-3} \text{lv}$  more than in the case of the Augustów Forest, but the chips from the spruce stumps (Nuutinen et al. 2014) had a calorific value close to the one obtained in Poland ( $16.4 \text{ MJ kg}^{-1}$  compared to  $15.5 \text{ MJ kg}^{-1}$ ). Bergström and Matisons obtained higher values for stumps from mineralised soil ( $17.1$  to  $17.9 \text{ MJ kg}^{-1}$ ), but significantly lower calorific values ( $14.3 \text{ MJ kg}^{-1}$ ) were found for stumps obtained from wetlands (Forest refine ... 2014).

Differences in ash content and calorific value can be generated not only by the different species composition of the stumps, but also by their exposure to atmospheric factors, particularly rainfall, which helps to wash the stump of mineral debris, thereby reducing the risk of damaging the shredders, as well as obtaining lower boiler efficiencies (Otepka 2013). Biomass is also affected by atmospheric humidity, especially in the climate of northern Europe, where there is a significant correlation between moisture in the wood and the seasons (Laurila, Lauhanen 2010).

## 5. Conclusions

Research has shown that stumps can be an effective source of biomass energy. Despite the involvement of a number of

machines in the production process, this activity is justified by the energy balance obtained. A low speed shredder and a screen are characterised by high reliability, and the raw material produced has an energy value similar to firewood.

## Conflict of interest

The author declares no potential conflicts of interest.

## Acknowledgements and source of funding

The research was financed from my own resources. I am grateful to the Augustów Forest Inspectorate for permission to conduct the research and the use of the source data.

## References

- Alakangas E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia [Właściwości paliw używanych w Finlandii]. Technical Research Centre of Finland, VTT Research Notes 2045: 1–189.
- Anderson N., Chung W., Loeffler D., Jones J.G. 2012. Productivity and cost comparison of two systems for producing biomass fuel from roadside forest treatment residues. *Forest Products Journal* 62(3): 222–233. DOI 10.13073/0015-7473-62.3.222.
- Berg S., Bergström D., Nordfjell T. 2015 Effect of stump size and timing of stump harvesting on ground disturbance and root breakage diameter. *Silva Fennica* 49(5): 1–17. DOI 10.14214/sf.1312.
- Bergström D., Matisons M. (ed.) 2014. Forest Refine, 2012–2014: efficient forest biomass supply chain management for biorefineries: synthesis report. Umeå, SLU, Uppsala, 1–113.
- Botwin M. 1993. Podstawy użytkowania maszyn leśnych, Warszawa, Wydawnictwo SGGW, 120 s. ISBN 83-00-02777-7.
- Eriksson A., Eliasson L. 2015. Analyzing machine concepts and delivery strategies to cut delivery costs for forest fuels using a discrete-event simulation model. Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference, 3194–3195. ISSN 1558-4305.
- Eriksson A., Eliasson L., Hansson P-A., Jirjis R. 2014. Effects of supply chain strategy on stump fuel cost: a simulation approach. *International Journal of Forestry Research* 2014, article ID 984395: 1–11. DOI 10.1155/2014/984395.
- Gałęzia T. 2013a. Bilans energetyczny oraz czasochłonność wybranych elementów w łańcuchu technologicznym pozyskiwania biomasy leśnej. *Sylwan* 157(6): 419–424.
- Gałęzia T. 2013b: Analiza efektywności wybranych metod pozyskiwania biomasy leśnej na cele energetyczne na przykładzie Puszczy Augustowskiej, w: Biomasa leśna na cele energetyczne. Instytut Badawczy Leśnictwa. Sękocin Stary, 127–137. ISBN 978-83-62830-18-3.
- Holzleitner F., Stampfer K., Visser R. 2011. Utilization rates and cost factors in timber harvesting based on long-term machine data. *Croatian Journal of Forest Engineering* 32(2): 501–508.
- IPCC. 2014. Summary for Policymakers, in: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: 1–32. ISBN 978-92-9169-143-2.
- Laitila J., Nuutinen Y. 2013. Efficiency of integrated grinding and screening of stump wood for fuel at roadside landing with a Crambo 6000 grinder equipped with a star screen. Demo Report 4: Innovative and effective technology and logistics for forest residual biomass supply in the EU: 1–11.
- Laitila J., Nuutinen Y. 2015. Efficiency of integrated grinding and screening of stump wood for fuel at roadside landing with a low-speed double-shaft Grinder and a star screen. *Croatian Journal of Forest Engineering* 36(1): 19–32.
- Laitila J., Ranta T., Asikainen A. 2008. Productivity of stump harvesting for fuel. *International Journal of Forest Engineering* 19(2): 37–47.
- Laitila J., Ranta T., Asikainen A., Jäppinen E., Korpinen O.-J. 2015. The cost competitiveness of conifer stumps in the procurement of forest chips for fuel in Southern and Northern Finland. *Silva Fennica* 49(2): 1–23. DOI 10.14214/sf.1280.
- Laurila J., Lauhanen R. 2010. Moisture content of Norway spruce stump wood at clear cutting areas and roadside storage sites. *Silva Fennica* 44(3): 427–434. DOI 10.14214/sf.140.
- Lazdinš A., Von Hofsten H., Lazdina D., Lazdāns L. 2009. Productivity and costs of stump harvesting for bioenergy production in Latvian conditions. Proceedings of 8th International Scientific Conference “Engineering for rural development”, Jelgava, 28-29.05.2009: 194–201. ISSN 1691-5976.
- Mitchell D. 2009. Stump harvesting. Council on Forest Engineering (COFE) Conference Proceedings: “Environmentally Sound Forest Operations”. Lake Tahoe, June 15-18, 2009: 1–6.
- Moffat A., Nisbet T., Nicoll B. 2011. Environmental effects of stump and root harvesting. Forestry Commission Research Note (FCRN009). Forestry Commission, Edinburgh. ISBN 978-0-85538-847-8.
- Nuutinen Y., Laitila J., Rytkönen E. 2014. Grinding of stumps, logging residues and small diameter wood using a CBI 5800 grinder with a truck as a base machine (brief report). *Baltic Forestry* 20(1): 176–188.
- Otepka P. (ed.) 2013. Guidebook on local bioenergy supply based on woody biomass. Scientific & Academic Publishing, Rosemead, 1–145. ISBN 978-1-938681-99-8.
- Spinelli R., Nati C., Magagnotti N. 2005. Harvesting and transport of root biomass from fast-growing poplar plantations. *Silva Fennica* 39(4): 539–548. DOI 10.14214/sf.365.
- Wartości opałowe (WO) i wskaźniki emisji CO<sub>2</sub> (WE) w roku 2013 do raportowania w ramach Wspólnotowego Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji za rok 2016, 2015: Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy. Warszawa.
- Ylitalo E. 2013. Puun energiakäyttö 2012 [Konsumpcja drewna w produkcji energii w roku 2012]. *Metsätalustiedote* 15: 1–7.