UNIWERSYTET PRZYRODNICZY W POZNANIU
WYDZIAŁ LEŚNY

JAKUB JAKUBOWSKI

NAKŁADY PRACY, ENERGII I EMISJE DWUTLENKU WĘGLA W PRACACH LEŚNYCH REALIZOWANYCH W DRZEWOSTANACH SOSNOWYCH

ENERGY AND LABOUR CONSUMPTION,
AND CARBON DIOXIDE EMISSIONS IN THE FOREST
TECHNOLOGICAL PROCESSES IN SCOTS PINE STANDS

Autoreferat pracy doktorskiej

Promotor:
Dr hab. inż. Krzysztof Jabłoński
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Wydział Leśny
Katedra Techniki Leśnej

Recenzenci:
Prof. dr hab. inż. Józef Walczyk, dr h.c.
Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja
w Krakowie, Wydział Leśny
Instytut Użytkowania Lasu i Techniki Leśnej
Zakład Mechanizacji Prac Leśnych

Dr hab. inż. Bolesław Porter, prof. nadzw.
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie, Wydział Leśny
Katedra Użytkowania Lasu

KATEDRA TECHNIKI LEŚNEJ

Poznań 2017

Wprowadzenie

Korzystanie z odnawialnych zasobami natury, do których zaliczają się lasy, nieuchronnie wiąże się ze stosowaniem procesów technologicznych, które poza niewątpliwie pozytywnymi efektami niosą także zagrożenia dla szeroko rozumianego środowiska przyrodniczego. Skończone zasoby nośników energii, konieczność przeciwdziałania przyczynom i niekorzystnym skutkom zmian klimatycznych, a także zobowiązania wynikające z umów międzynarodowych, zmuszają do spojrzenia na procesy technologiczne realizowane w leśnictwie w nowy sposób.

Na tym tle problematyka nakładów energii ponoszonej w trakcie realizowania procesu produkcji drewna oraz towarzyszące jej emisje gazów cieplarnianych, a w szczególności CO_2, nabierają niezwykle istotnego znaczenia. W literaturze przedmiotu można napotkać pozycje omawiające te zagadnienia, jednak tylko w odniesieniu do pojedynczych technologii pozyskiwania drewna. Nadal niewiele można się dowiedzieć na temat całkowitych nakładów energii, jakie ponoszone są w pracach leśnych wykonywanych przez cały okres kolei rębu pospolitych gatunków lasotwórczych. Niniejsza praca ma stanowić próbę uzupełnienia istniejącej luki w badaniach naukowych.

W Polsce zdecydowana większość prac leśnych jest realizowana w technologii ręczno-maszynowej (Stempski i Grodecki 2007, Długosiewicz i Grzebieniowski 2009). Udział technologii pozyskiwania drewna na ręczno-maszynowym poziomie zmechanizowania, ze ścinką pilarką spalinową i zrywką półpodwieszoną i nasiębierną wynosi ponad 95 % (Nurek 2005, Sowa 2009). Jednak w niektórych krajach Europy (m.in. w krajach skandynawskich) większość zabiegów realizuje się w technologii maszynowej. W Szwecji prawie 90 % miąższości drewna pozyskuje się za pomocą harwesterów i zrywa za pomocą forwarderów (Athanassiadiss i in. 1999). Wprowadzanie tego typu maszyn na dużą skalę znacząco zwiększyło wydajność prac leśnych, ale także odciążyło robotników leśnych od trudnych i niebezpiecznych czynności (Axelsson i Pontèn 1990). Równocześnie spowodowało to także gwałtowny wzrost zużycia paliwa, olejów smarowych oraz emisję gazów cieplarnianych do środowiska.

W literaturze naukowej uwaga skupia się głównie na zużyciu paliwa i smarów przez maszyny oraz na szkodach glebowych, korzeni czy pni pozostałych drzew. Rzadko uwzględnia się odziaływanie procesu produkcji maszyny oraz konserwację maszyny w środowiskowym kontekście. Powodem jest przeświadczenie, że procesy te zajmują niewiele znaczący odsetek ogólnego zużycia energii i emisji CO_2 przez maszyny robocze (Athanassiadis 2002).

W związku z powyższym nasuwają się pytania, jaka ilość energii jest potrzebna do zrealizowania wszystkich prac mających na celu wyhodowanie dojrzałego drzewostanu, od momentu przygotowania powierzchni pozrębowej, poprzez posadzenie uprawy aż do przeprowadzenia cięć rębnych? Jak kształtuje się pracochłonność poszczególnych zabiegów technologicznych? W którym momencie cyklu rębnego drzewostanu te nakłady pracy i energii są największe, a w którym najmniejsze? Jak zmienia się dynamika emisji CO_2 w całym toku czynności gospodarczych drzewostanu?

Mając na uwadze powyższe rozważania dotyczące stanu badań na temat energochłonności operacji technologicznych w leśnictwie oraz możliwości ich rozwoju, uznano za stosowne przeprowadzenie analizy pracochłonności, energochłonności oraz emisji dwutlenku węgla w zabiegach technologicznych, realizowanych na przestrzeni całej kolei rębu drzewostanu sosnowego.

Cel i zakres pracy

Celem badań było określenie kształtowania się łącznych nakładów czasu pracy, pracochłonności, energii i emisji dwutlenku węgla (CO_2) niezbędnych do wyhodowania dojrzałego drzewostanu sosnowego na jednym z najbardziej typowych dla niego siedlisk – borze świeżym (Bśw). Postanowiono przeprowadzić szczegółową analizę ilości pracy i energii jakie ponoszone są w trakcie wykonywania typowych zabiegów technologicznych oraz określić jakie towarzyszą tym czynnościom emisje CO_2 - od momentu założenia uprawy leśnej aż do wykonania cięć rębnych. Poszukiwano odpowiedzi na pytania o kształtowanie się dynamiki zmian badanych wartości (praca, energia, emisje CO_2) oraz o położenie maksimum nakładu czasu pracy, energii i emisji CO_2 na przestrzeni całej kolei rębu.

W badaniach wyszczególniono następujące cele cząstkowe:

- określenie pracochłonności i wydajności poszczególnych zabiegów technologicznych,
- analiza nakładów energii podczas wykonywania prac technologicznych, a w szczególności energii zawartej w paliwie, energii wydatkowanej przez operatora oraz energii zużytej podczas procesu produkcji maszyny (energii wbudowanej w maszynę)
- określenie wielkości emisji dwutlenku węgla podczas prac leśnych,

Zakres prac obejmował badania nad typowymi operacjami leśnymi prowadzonymi w drzewostanach sosnowych wszystkich klas wieku reprezentujących całą kolej rębu. Wybrano drzewostany rosnące na siedlisku boru świeżego, ponieważ jest to jeden z dominujących typów siedliskowych lasu dla sosny w Polsce (Dyrekcja…2015). Badania objęły analizę czasu pracy, pracochłonności, nakłady energii wydatkowanej na wykonanie zabiegów technologicznych (w tym energia w paliwie spalonym przez zastosowane środki techniczne, energia wydatkowana przez operatorów, energia „zawarta w maszynie" – wynikająca z procesów produkcji maszyn i urządzeń) oraz emisje CO_2 towarzyszące operacjom leśnym wynikające ze spalenia paliw

zastosowanych do napędu maszyn. Analizowane prace leśne podzielono na następujące kategorie:

- zakładanie uprawy wraz z przygotowaniem gleby,
- czynności związane z pielęgnacją uprawy,
- cięcia przedrębne (wszystkie cięcia w całej kolei rębu),
- cięcia rębne wraz z rozdrobnieniem pozostałości zrębowych.

Zastosowane technologie realizowane były na poziomie maszynowym (w cięciach rębnych - ryc.1) i ręczno – maszynowym (w cięciach przedrębnych). Badania przeprowadzono w latach 2012 - 2015 w zachodniej Wielkopolsce na obszarze Nadleśnictwa Grodziec, które podlega Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Poznaniu.

Ryc. 1. Realizacja zabiegu technologicznego Cięć rębnych – poziom maszynowy (a – ścinka z okrzesywaniem i przerzynką za pomocą harwestera; b – ułożenie sortymentów surowca przez harwester, c – zrywka surowca za pomocą forwardera *(fot. autor)*

Materiał i metody

Badania przeprowadzono w okresie od października 2012 do listopada 2015 na terenie Nadleśnictwa Grodziec, wchodzącego w skład Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Poznaniu (ryc. 2).

Ryc. 2. Położenie Nadleśnictwa Grodziec na tle regionalnych dyrekcji Lasów Państwowych (źródło: https://poznan.lasy.gov.pl)

Prace terenowe rozpoczęto od wyboru powierzchni badawczych, na których miały zostać zrealizowane zabiegi technologiczne na obszarze całego Nadleśnictwa. W tym celu przeanalizowano zestawienie wszystkich typowych prac leśnych zaplanowanych na lata 2013 i 2014, posługując się wyciągiem z planów gospodarczych zapisanych w Systemie Informatycznym Lasów Państwowych (System…1995) oraz operatem urządzeniowym Nadleśnictwa Grodziec (Biuro Urządzania…2008). Przy wyborze kierowano się podobieństwem pod względem warunków wzrostowych drzewostanów sosnowych. Najważniejszym czynnikiem warunkującym wybór konkretnej powierzchni był ten sam typ siedliskowy – bór świeży.

Wyróżniono 13 typowych zabiegów technologicznych w poszczególnych fazach rozwojowych drzewostanu sosnowego. Wybrane prace leśne podzielono na 3 grupy: zakładanie i pielęgnacja uprawy, cięcia przedrębne i cięcia rębne. Zabiegi te wyszczególniono w poniższym zestawieniu - granice wiekowe poszczególnych faz rozwojowych dla sosny przyjęto za Ważyńskim (2008):

A. ZAKŁADANIE I PIĘLĘGNACJA UPRAWY

a) faza uprawy (do 10 lat)

- **(1) Orka -** przygotowanie gleby – wyorywanie bruzd
- **(2) Sadzenie** - sadzenie ręczne
- **(3) CW** - pielęgnacja uprawy – czyszczenie wczesne

B. POZYSKANIE DREWNA W CIĘCIACH PRZEDRĘBNYCH

b) faza młodnika (do 20 lat)

- **(4) CP** – pielęgnacja młodnika - czyszczenia późne
  - ♦ bez pozyskania surowca

c) faza tyczkowiny (do 30 lat)

- **(5) TW 21-30** - trzebież wczesna w przedziale wieku od 21 do 30 lat
  - ♦ pozyskanie + zrywka surowca

d) faza drągowiny (do 50 lat)

- **(6) TW 31-40** - trzebież wczesna w przedziale wieku od 31 do 40 lat
  - ♦ pozyskanie + zrywka surowca
- **(7) TP 41-50** - trzebież późna w przedziale wieku od 41 do 50 lat
  - ♦ pozyskanie + zrywka surowca

d) faza drzewostanu dojrzewającego (do 80 lat)

- **(8) TP 51-60** - trzebież późna w przedziale wieku od 51 do 60 lat
  - ♦ pozyskanie + zrywka surowca
- **(9) TP 61-70** - trzebież późna w przedziale wieku od 61 do 70 lat
  - ♦ pozyskanie + zrywka surowca
- **(10) TP 71-80** - trzebież późna w przedziale wieku od 71 do 80 lat
  - ♦ pozyskanie + zrywka surowca

e) faza drzewostanu dojrzałego (do 100 lat)

- **(11) TP 81-90** - trzebież późna w przedziale wieku od 81 do 90 lat
  - ♦ pozyskanie + zrywka surowca

B. POZYSKANIE DREWNA W CIĘCIACH RĘBNYCH

f) faza starodrzewia (powyżej 90 lat)

- **(12) Cięcia rębne** – operacje na powierzchni zrębowej (ścinka, okrzesywanie, wyrzynka sortymentów wraz z układaniem)
  - ♦ pozyskanie + zrywka surowca
- **(13) Rozdrabnianie pozostałości zrębowych**

W efekcie otrzymano 13 powierzchni badawczych zlokalizowanych na terenie siedmiu leśnictw. Na każdej z nich przeprowadzono pomiar cech taksacyjnych drzewostanu (*pomiary wstępne*), który rósł na wybranej powierzchni badawczej. *Pomiary wstępne* miały na celu określenie charakterystyki dendrometrycznej drzewostanu przed zabiegiem - pomiar pierśnic i wysokości drzew na powierzchni w celu określenia przeciętnej pierśnicy drzewostanu, wykreślenia krzywej wysokości oraz obliczenia miąższości drzewostanu. W obliczeniach miąższości posługiwano się tablicami miąższości drzew stojących (Czuraj, Radwański, Strzemeski 1960) oraz tablicami zasobności i przyrostu drzewostanów (Czuraj 1997).

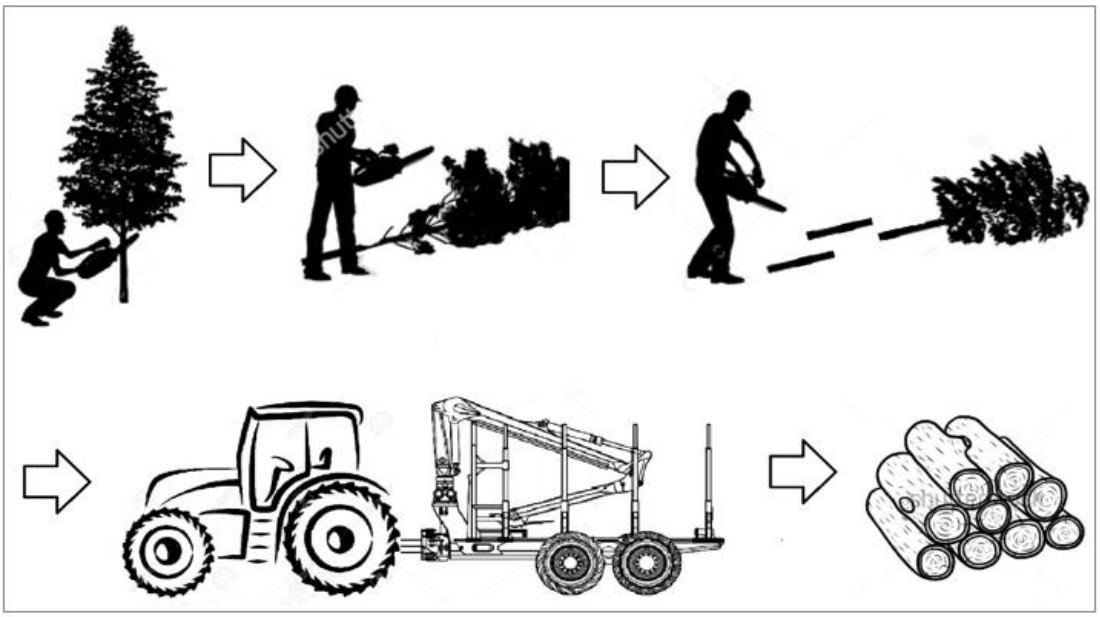
Pomiar operacyjnego czasu pracy (T_{02})

W celu określenia czasu pracy prowadzono chronometraż wyrywkowy czasu pracy (Żurek 2007), który stanowił jeden z elementów pomiarów, nazwanych w pracy *pomiarami właściwymi*. Podczas trwania każdego zabiegu technologicznego (ryc. 3) dokonywano pomiaru czasu operacyjnego wykonywanych operacji z uwzględnieniem podkategorii czasu operacyjnego. Ocenę czasu pracy robotników i maszyn w operacjach technologicznych prowadzono zgodnie z normą branżową BN-76/9195-01 (Norma… 1976). Przedmiotem analizy czasu pracy był czas operacyjny T_{02} z uwagi na to, że tej kategorii czasu towarzyszy wydatek energii i emisja CO_2.

Aby określić czas operacyjny T_{02}, dokonywano rejestracji elektronicznej wykonywanych czynności w kilku lub kilkunastu powtarzanych sekwencjach czasowych. Każda sekwencja czasowa rejestrowała przebieg kilku takich samych cykli danej czynności rozpoczynającej się i kończącej w tym samym momencie cyklu. Przykładowo, podczas trzebieży późnej jedna sekwencja obejmowała z reguły 6-10 cykli ścinki i obróbki drzewa. Cykl trwał od momentu podejścia drwala do drzewa, poprzez oczyszczenie pnia z gałęzi, proces ścinki, obalanie i okrzesywanie aż do momentu podejścia do kolejnego wyznaczonego do ścinki drzewa. Suma pomiarów ze wszystkich sekwencji czasowych z danej powierzchni, pozwalała uzyskać próbę obejmującą 35-55 drzew na każdy analizowany drzewostan.

Pomiary sekwencji czasowych rozłożono równomiernie dla całego czasu pracy wykonywania danej operacji technologicznej, aby otrzymać średnią ocenę czasu dla konkretnej operacji. Pomiary sekwencji przeważnie realizowano w minimum pięciu punktach czasowych: na początku operacji, po wykonaniu ok. 1/3 zabiegu, w połowie, po ok. 2/3, w końcowej fazie trwania operacji technologicznej oraz często pomiędzy nimi.

Założenia metodyczne wykorzystujące pomiary próbnych sekwencji czasowych przyjęto za Szewczykiem (2012).



Ryc. 3. Schemat wykonywania zabiegów technologicznych trzebieży wczesnych i późnych na powierzchniach badawczych (źródło: http://www.gettyimages.com; https://www.123rf.com)

Określanie pracochłonności i wydajności

Dokonując oceny pracy w analizowanych zabiegach technologicznych, wykorzystano wskaźniki pracy, jak pracochłonność i wydajność. Określono pracochłonność i wydajność operacyjną dla poszczególnych sekwencji czasowych oraz dla całego zabiegu technologicznego przeprowadzonego na powierzchni badawczej. Dla wszystkich 13 zabiegów technologicznych wskaźniki pracy wyrażono w odniesieniu do jednostki powierzchni 1 ha (pracochłonność operacyjna w [h/ha], wydajność operacyjna w [ha/h]). Dla zabiegów technologicznych od nr 5 do nr 12, wskaźniki pracy przeliczono dodatkowo w odniesieniu do 1 m^3 pozyskanego surowca drzewnego.

Określanie zużycia energii na wykonywane czynności

Dla każdej z badanych operacji technologicznych obliczono jej energochłonność, która stanowiła sumę trzech następujących rodzajów energii: energii zawartej w paliwie zużytej podczas wykonywania operacji technologicznej; energii zużytej podczas procesu produkcji maszyny (energia wbudowana w maszyny i urządzenia) oraz wydatku energetycznego operatora maszyny lub urządzenia (koszt energetyczny operatora).

Wartości energochłonności dla wszystkich trzynastu zabiegów technologicznych wyrażono w odniesieniu do jednostki powierzchni (1 ha), aby móc porównać je między sobą. Ponadto w zabiegach technologicznych, gdzie pozyskiwano surowiec drzewny energochłonność wyrażono także w odniesieniu do jednostki surowca (1 m^3 drewna).

Określenie emisji dwutlenku węgla (E_m)

Emisje dwutlenku węgla CO_2 towarzyszące wykonywanym operacjom leśnym wynikające ze spalania paliwa, określono na podstawie wskaźników emisji dla poszczególnych maszyn i urządzeń określonych przez Schwaigera i Zimmera (2001).

Analiza statystyczna

Wyniki badań pracochłonności operacyjnej (P_{02}) i czasu operacyjnego (T_{02}) operacji technologicznych zostały poddane analizom statystycznym. Zastosowane metody analizy statystycznej wyników przeprowadzonych badań obejmowały:

- podstawowe charakterystyki statystyczne poszczególnych zmiennych (średnia arytmetyczna, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności, wartość minimum i maximum),
- analizę wariancji w układzie jednoczynnikowym (kiedy rozkłady zmiennych były zgodne z rozkładem normalnym i spełniony był warunek jednorodności wariancji),
- w przypadku odrzucenia hipotezy o jednorodności wariancji zastosowano przedziały ufności dla średniej oraz testy nieparametryczne: test mediany i test rang Kruskala-Wallisa (Kruskal i Wallis 1952),
- analizę regresji (tylko dla pracochłonności ścinki z okrzesywaniem i przerzynką),
- analizę wariancji doświadczenia blokowego z nierównymi blokami, w którym blokami był wiek drzew a zmienną badana pracochłonność (tylko dla pracochłonności zrywki) (Goodnight 1980).

Analizy statystyczne miały na celu sprawdzenie istotności różnic i określenie jednorodnych grup zabiegów technologicznych (grup wiekowych drzew). Wszystkie obliczenia statystyczne wykonano z wykorzystaniem programu komputerowego *Statistica 13*.

Wyniki badań i ich analiza

Czas operacyjny (T_{02})

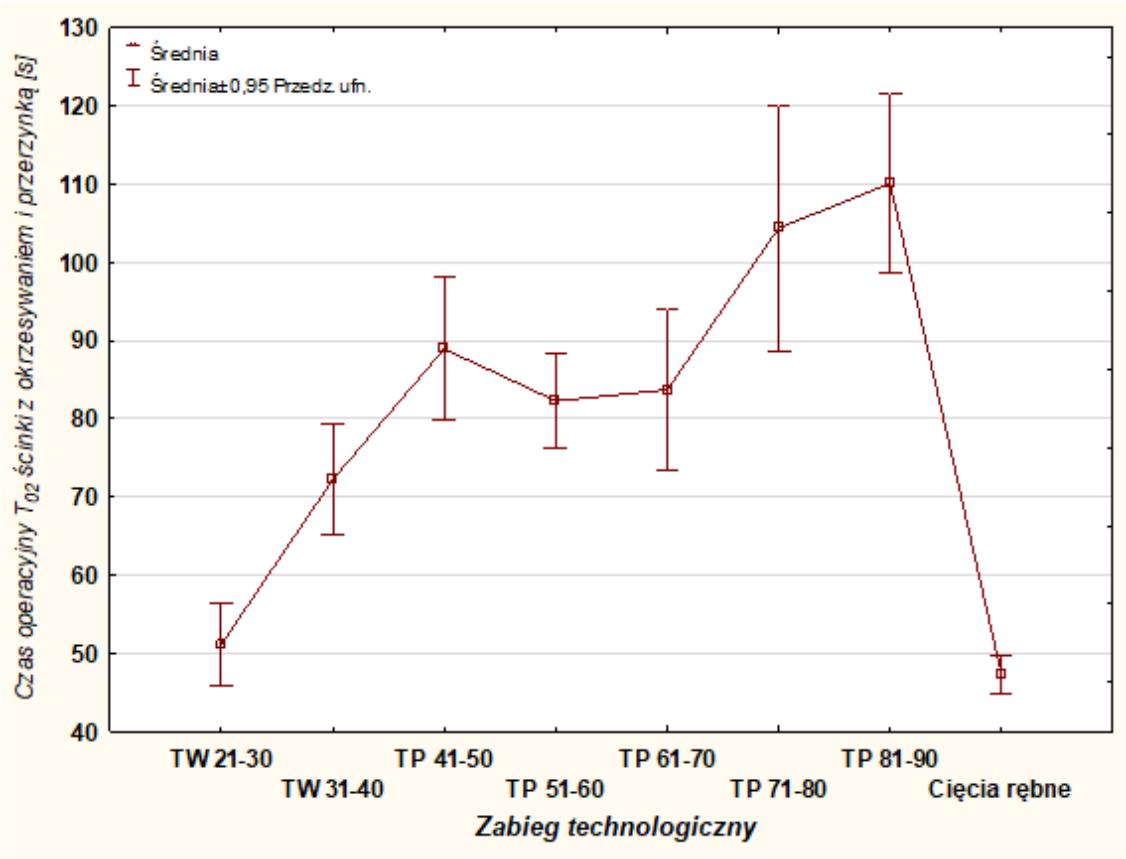
W tabeli 1 przedstawiono wyniki statystycznej analizy opisowej dla cykli pomiarowych T_{02} odpowiednio dla ścinki z okrzesywaniem i przerzynką, a także dla cykli pomiarowych zrywki. Wyniki analizy dotyczą 8 zabiegów technologicznych spośród 13 badanych (TW 21-30; TW 31-40, TP 41-50, TP 51-60, TP 61-70, TP 71-50, TP 81-90, Cięcia rębne), dlatego gdyż w ramach tych 8 można było wyróżnić takie same, powtarzalne operacje technologiczne (ścinka z okrzesywaniem i przerzynką + zrywka).

Tabela 1. Charakterystyka statystyczna czasu operacyjnego T_{02} poszczególnych czynności w operacjach technologicznych w poszczególnych zabiegach technologicznych trzebieżowych (zabiegi od 5 do 11)

Zabieg technologiczny	Operacja technologiczna	Liczba cykli N [szt.]	Średnia odległość zrywki [m]	Średnia X [s] (ścinka – dotyczy 1 drzewa)	Odchylenie standardowe SD [s]	Współczynnik zmienności V [%]
TW 21-30	Ścinka	79	-	51,18	23,24	45,42
	Zrywka	7	626	1227,71	206,82	16,85
TW 31-40	Ścinka	67	-	72,22	28,96	40,09
	Zrywka	8	523	1094,38	179,62	16,41
TP 41-50	Ścinka	47	-	88,91	30,93	34,79
	Zrywka	8	685	1286,25	208,29	16,19
TP 51-60	Ścinka	53	-	82,26	21,70	26,38
	Zrywka	8	351	1140,88	196,32	17,21
TP 61-70	Ścinka	61	-	83,69	39,81	47,56
	Zrywka	8	504	1354,25	275,81	20,37
TP 71-80	Ścinka	40	-	104,35	49,22	47,16
	Zrywka	9	682	1528,00	127,27	8,33
TP 81-90	Ścinka	69	-	110,09	47,84	43,45
	Zrywka	6	940	1870,67	146,73	7,84
Cięcia rębne	Ścinka	108	-	47,39	12,81	27,03
	Zrywka	7	832	2094,86	577,57	27,57
	Zrywka (WW+S10)	8	452	1706,50	364,98	21,39

Z wykresu na rycinie 4 wynika, że czas ścinki z okrzesywaniem i przerzynką rośnie wraz z wiekiem drzew dla zabiegów od TW 21-30 do TW 41-50. Dla zabiegów TP 41-50, TP 51-60 i TP 61-70 czas operacyjny T_{02} nie różni się istotnie.

W zakresie zabiegów od TP 61-70 aż do TP 81-90, wartość czasu ścinki z okrzesywaniem i przerzynką znów rośnie. Nieznaczny spadek czasu ścinki z okrzesywaniem i przerzynką dla zabiegu TP 51-60 spowodowany jest mniejszymi dymensjami ścinanych drzew oraz słabszym ich ugałęzieniem. W Cięciach rębnych osiągnięto najniższe wartości. W wyniku analizy wyróżniono 4 grupy średnich: I grupa – TW 21-30 i Cięcia rębne, II grupa – TW 31-40, III grupa – TP 41-50, TP 51-60 i TP 61-70, IV grupa – TP 71-80 i TP 81-90.

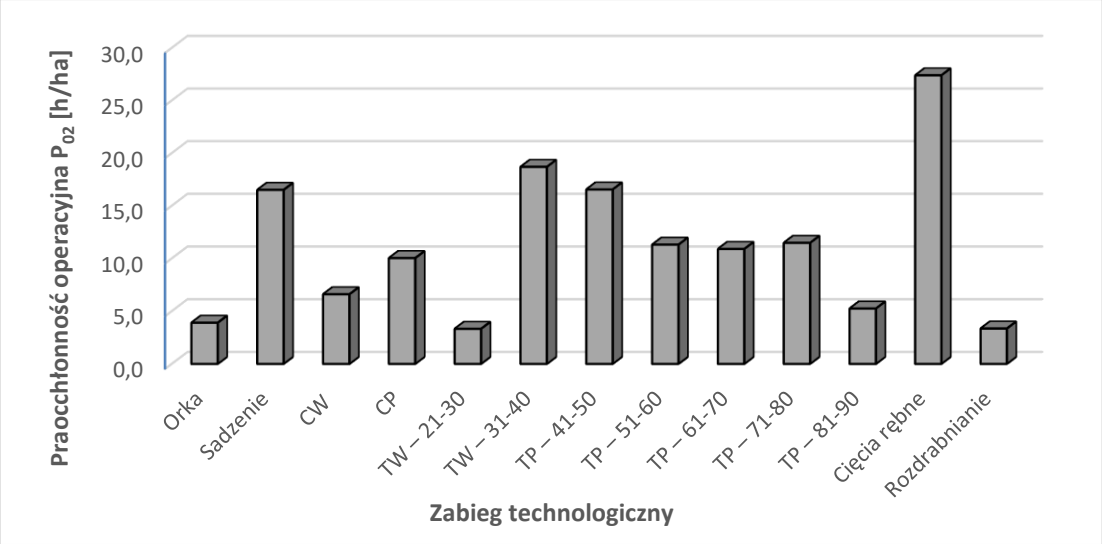


Ryc. 4. Wykres średnich i przedziałów ufności dla czasu operacyjnego T_{02} ścinki z okrzesywaniem i przerzynką

Zarówno w wyniku przeprowadzonego testu mediany (wartość statystyki testowej chi kwadrat wyniosła $\chi^2 = 181{,}44$ przy liczbie stopni swobody df = 7) jak i testu Kruskala-Wallisa dla rang (wartość statystyki testowej wyniosła H (7, N = 541) = 183,62), uzyskano potwierdzenie, że rozważane zabiegi różniły się istotnie między sobą.

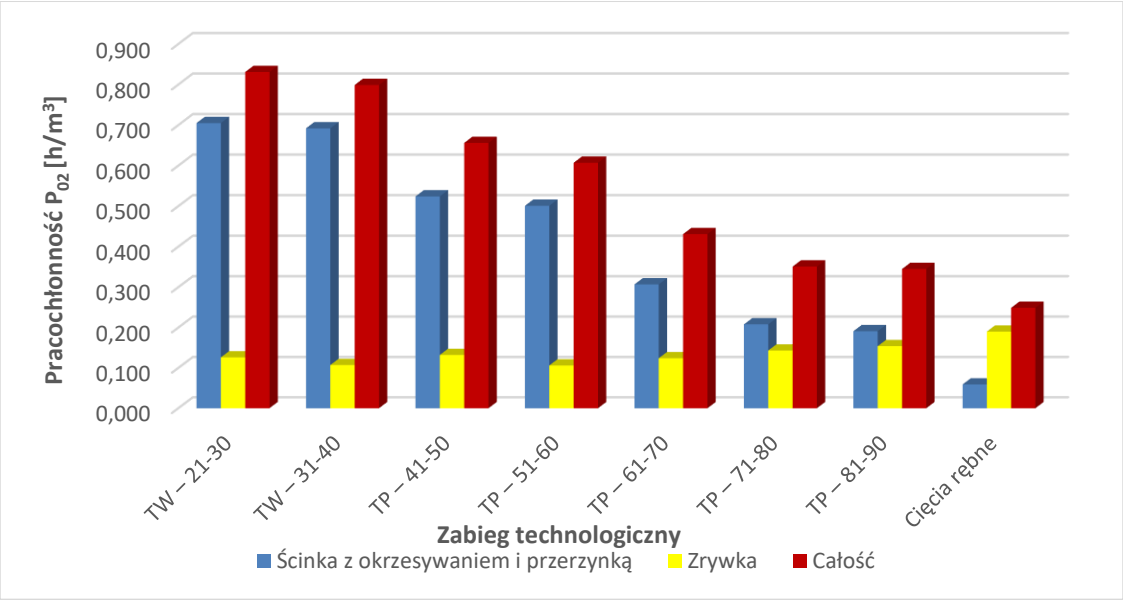
Pracochłonność operacyjna (P_{02})

Analiza pracochłonności w odniesieniu do powierzchni 1 ha wykazała, że spośród analizowanych zabiegów technologicznych realizowanych na 13 powierzchniach badawczych, największą pracochłonnością operacyjną sumaryczną charakteryzował się zabieg Cięć rębnych – 27,390 h/ha (ryc. 5). Zabiegiem wymagającym najmniejszej pracochłonności operacyjnej była TW 21-30 (3,324 h/ha).



Ryc. 5. Pracochłonności operacyjne P_{02} poszczególnych zabiegów technologicznych [h/ha]

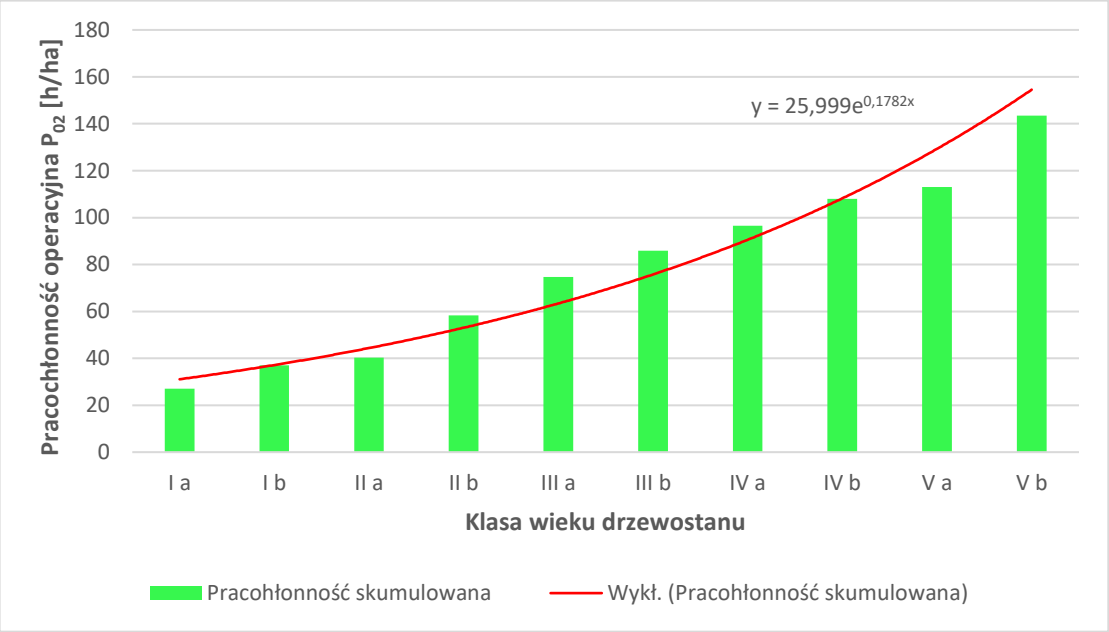
Aby pozyskać 1 m^3 surowca drzewnego w zabiegu trzebieży wczesnej TW 21-30 należało poświęcić 0,831 h pracy (ryc. 6). To ponad trzykrotnie więcej niż w Cięciach rębnych, gdzie niezbędny był nakład pracy 0,249 h oraz ponad dwukrotnie więcej niż w zabiegu trzebieży późnej TP 81-90 (0,345 h).



Ryc. 6. Pracochłonności P_{02} operacji dotyczących pozyskania i zrywki drewna w przeprowadzonych zabiegach technologicznych w odniesieniu do 1 m^3 surowca

Pracochłonność operacyjna P_{02} skumulowana w zabiegach technologicznych realizowanych na przestrzeni całej kolei rębu

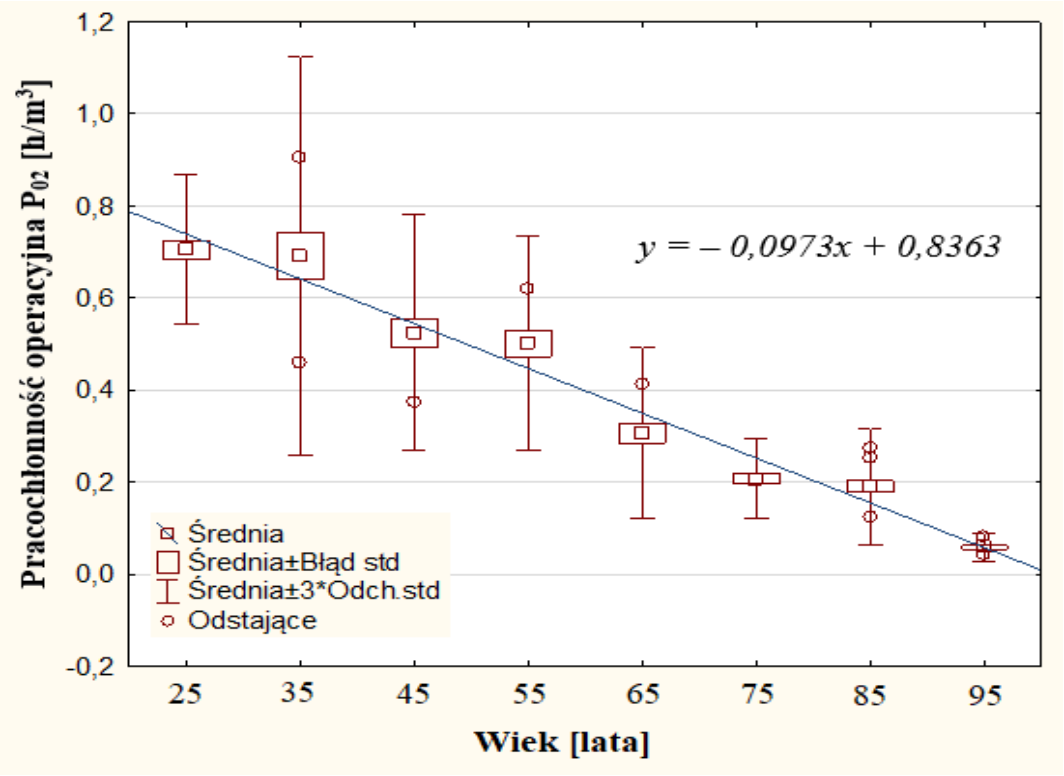
Po wykonaniu wszystkich zabiegów technologicznych w całej kolei rębu na wielkości 1 ha, pracochłonność skumulowana P_{02} zabiegów technologicznych wyniosła 145,288 h/ha (ryc. 7). Aby zrealizować wszystkie zabiegi trzebieży wczesnych i późnych (od TW 21-30 do TP 81-90) należało wykonać pracę wielkości 75,502 h/ha, co stanowiło ponad 50 % całkowitych nakładów pracy w zabiegach w całej kolei rębu.



Ryc. 7. Skumulowane pracochłonności operacyjne P_{02} zabiegów technologicznych w kolei rębu w przeliczeniu na 1 ha

Analiza regresji – pracochłonność ścinki z okrzesywaniem i przerzynką

Zastosowano regresję liniową pracochłonności P_{02} względem wieku drzewostanu. Rycina 8. pokazują wyraźnie, że zależność pomiędzy pracochłonnością ścinki wraz z okrzesywaniem i przerzynką maleje liniowo wraz ze wzrastającym wiekiem drzew. Średnia pracochłonność wahała się od 0,058625 h/m^3 w Cięciach rębnych do 0,705286 h/m^3 dla zabiegu technologicznego TW 21-30. Analiza wariancji pracochłonności P_{02} ścinki wraz z okrzesywaniem i przerzynką wykazała, że regresja liniowa była statystycznie istotna – wartość p mieściła się poniżej poziomu istotności α = 0,05. Modelem opisującym zależność pracochłonności ścinki z okrzesywaniem i przerzynką drzew w zależności od wieku drzew jest następujący model regresji liniowej: y = - 0,009635 x + 0,980034, gdzie „y" to pracochłonność przy ścince z okrzesywaniem i przerzynką, a „x" to wiek drzewa.



Ryc. 8. Przebieg średnich pracochłonności P_{02} ścinki z okrzesywaniem i przerzynką w zależności od wieku drzewostanu (zabiegu technologicznego)

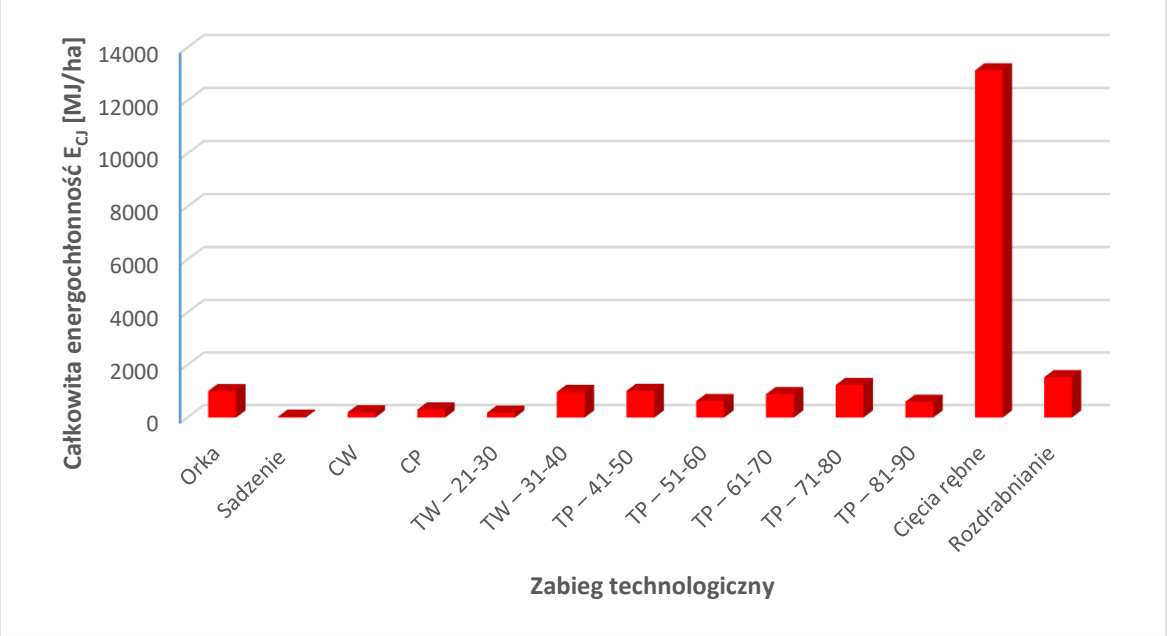
Obliczono średnie i przedziały ufności dla średnich pracochłonności ścinki z okrzesywaniem i przerzynką, dla każdego zabiegu technologicznego w danym dziesięcioleciu. Przyjęto, że statystycznie istotne różnice wystąpiły pomiędzy tymi średnimi, których przedziały ufności były rozłączne. Wyróżniono pięć grup wiekowych: I grupa – TW 21-30 (25 lat) i TW 31-40 (35 lat); II grupa – TP 41-50 (45 lat) i TP 51-60 (55 lat), III grupa – TP 51-60 (55 lat), IV grupa – TP 71-80 (75 lat) i TP 81-90 (85 lat), V grupa – TP 81-90 (95 lat).

Test mediany (wartość statystyki testowej chi-kwadrat wyniosła χ^2 = 56,99849 przy liczbie stopni swobody df = 7) oraz test Kruskala Wallisa (wartość statystyki testowej wyniosła H (7, N = 63) = 57,27669) również wykazały, że rozważane powierzchnie różniły się istotnie pod względem mediany.

Zużycie energii

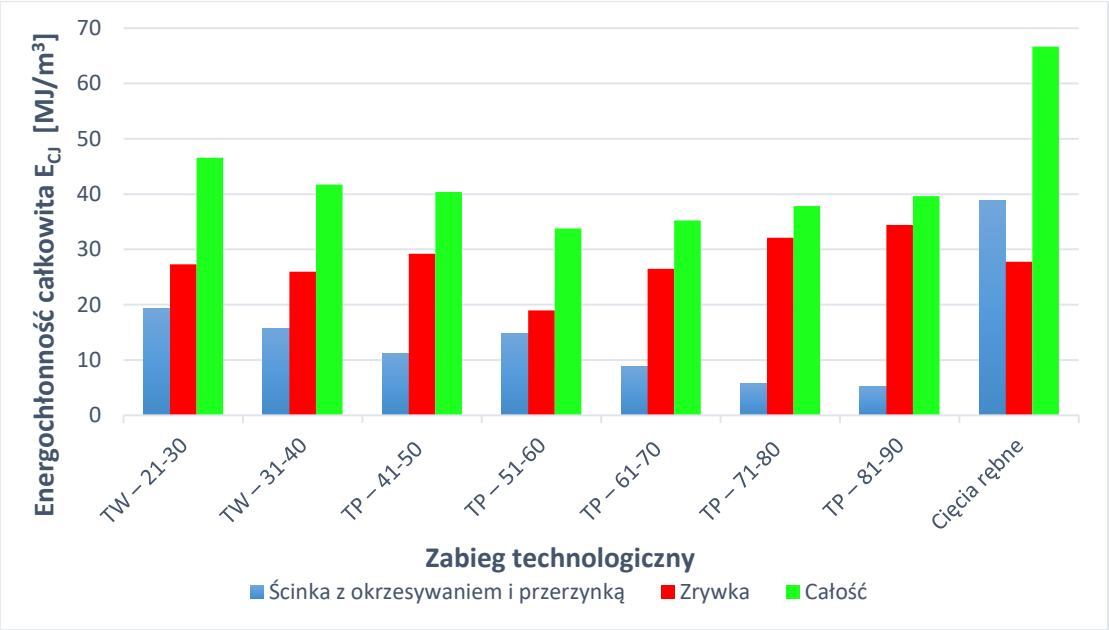
Całkowite nakłady energetyczne operacji technologicznej (Ewc)

Analizując energochłonność w odniesieniu do powierzchni 1 ha, wykazano, że całkowita ilość energii konieczna do przeprowadzenia wszystkich zabiegów technologicznych w cyklu rębnym drzewostanu wyniosła 21 770,61 MJ/ha (ryc. 9). Najbardziej energochłonnym zabiegiem okazały się Cięcia rębne – aby przeprowadzić operację ścinki harwesterem wraz z okrzesywaniem i przerzynką oraz operacje zrywki drewna zarówno wielko- jak i średniowymiarowego na powierzchni 1 ha, niezbędne było 13140,04 MJ energii. To ponad 8 razy więcej niż w przypadku drugiego w kolejności zabiegu – Rozdrabniania pozostałości zrębowych, gdzie całkowite zużycie energii wyniosło tylko 1535,49 MJ/ha. Najmniej energii wymagał zabieg Sadzenia ręcznego – 34,07 MJ/ha. Nakłady energetyczne trzebieży zarówno wczesnych jak i późnych mieściły się w zakresie od 186,36 MJ/ha (dla zabiegu TW 21-30) do 1240,43 MJ/ha (dla zabiegu TP 71-80).



Ryc. 9. Całkowite nakłady energii zabiegów technologicznych

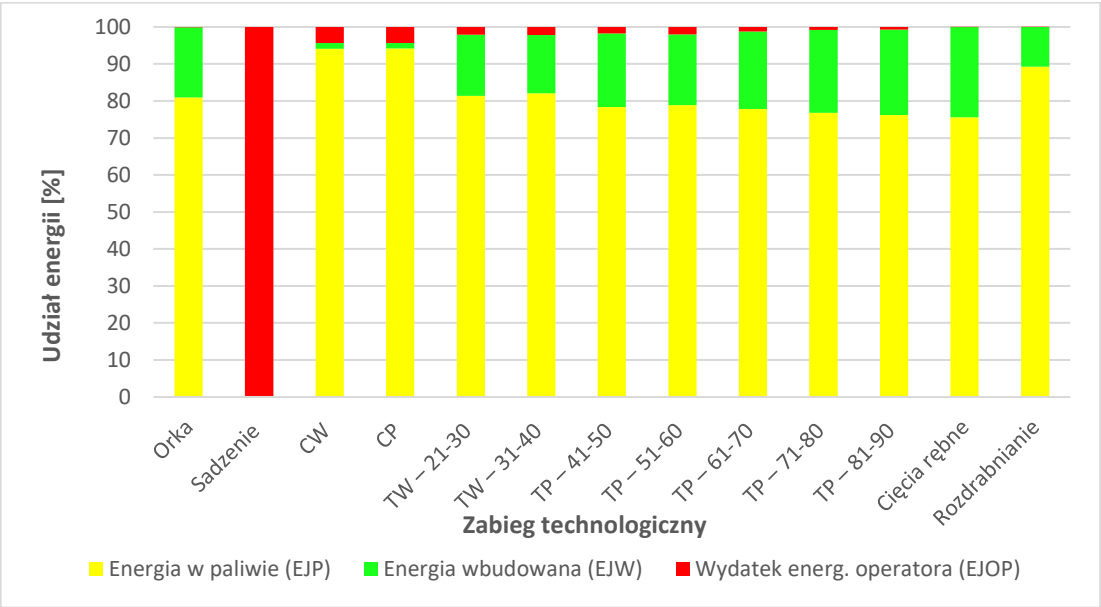
Aby pozyskać i zerwać 1 m^3 surowca drzewnego najwięcej energii zużyto podczas realizacji Cięć rębnych (66,68 MJ) (ryc. 10). Z kolei najniższą energochłonnością pozyskania i zrywki drewna łącznie, charakteryzowała się powierzchnia, gdzie realizowano trzebież późną TP 51-60 (33,81 MJ/m^3). Na rycinie 33 widać wyraźnie, że wraz z wiekiem podczas realizacji poszczególnych zabiegów technologicznych maleje całkowita energochłonność (do III klasy wieku włącznie), następnie od IV klasy rośnie.



Ryc. 10. Całkowite nakłady energetyczne podczas realizacji operacji technologicznych w poszczególnych zabiegach technologicznych wyrażone w [MJ/m^3]

Udział procentowy poszczególnych rodzajów energii w całkowitej energochłonności zabiegu technologicznego

Przeważającą częścią całkowitej energii zabiegów technologicznych była energia zawarta w paliwie (E_{JP}), która w każdym z 12 zabiegów stanowiła ponad 70 % całkowitej energii (ryc. 11). Wyjątkiem był zabieg Sadzenia ręcznego, gdzie nie zastosowano maszyn z silnikiem spalinowym, dlatego wartość E_{JP} wyniosła 0,00 %. W tym zabiegu 100 % poniesionej energii stanowił wydatek energetyczny operatora.

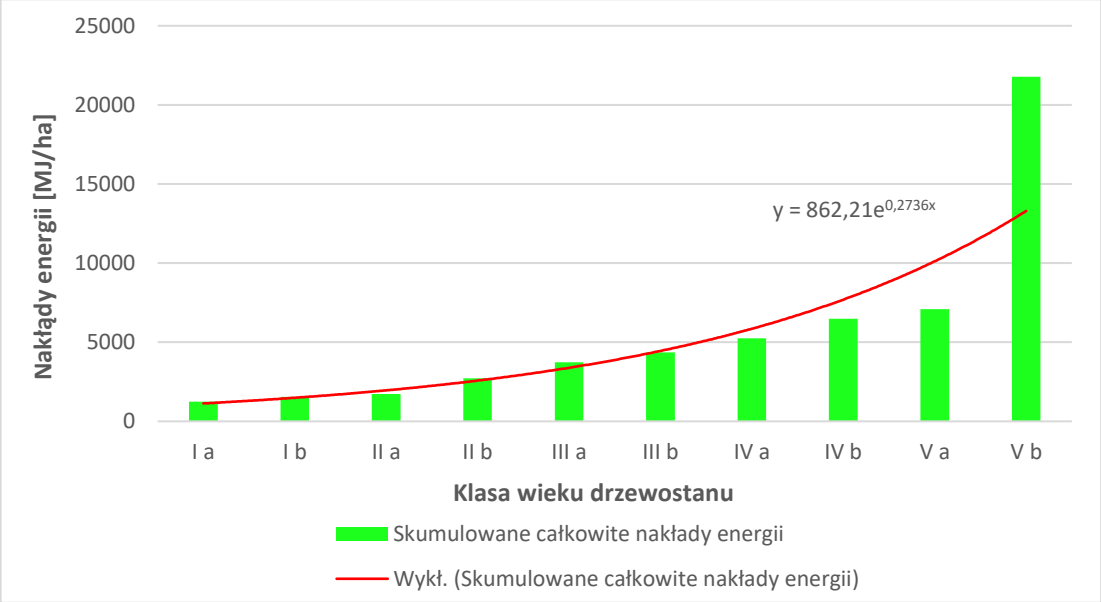


Ryc. 11. Udział procentowy poszczególnych rodzajów energii w całkowitej energochłonności zabiegu technologicznego

Energia wbudowana w maszynę stanowiła średnio 15 % całkowitej energochłonności realizowanego zabiegu technologicznego (z wyjątkiem sadzenia ręcznego). Wraz ze wzrostem wieku drzewostanu stwierdzono niewielką tendencję wzrostową udziału energii wbudowanej w zastosowany sprzęt techniczny. Analizując udział wydatku energetycznego operatora zaobserwowano tendencję malejącą wraz z rosnącym wiekiem drzewostanu.

Skumulowane całkowite nakłady energetyczne (E_{WC}) w zabiegach technologicznych na przestrzeni całej kolei rębu drzewostanu

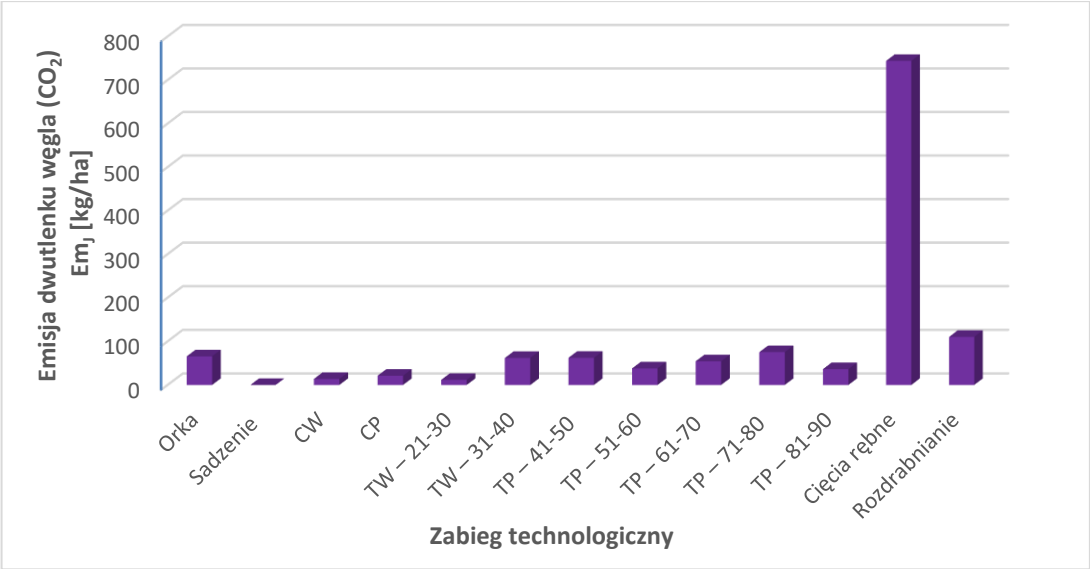
Po wykonaniu wszystkich 13 zabiegów technologicznych w całej kolei rębu na wielkości 1 ha, energochłonność skumulowana zabiegów technologicznych wyniosła 21770,61 MJ/ha (ryc. 12). Energochłonność wszystkich zabiegów trzebieży wczesnych i późnych (od TW 21-30 do TP 81-90) wyniosła 5544,75 MJ/ha.



Ryc. 12. Skumulowane całkowite nakłady energii zabiegów technologicznych zrealizowanych w przeliczeniu na 1 ha

Emisja dwutlenku węgla (CO_2) (Em)

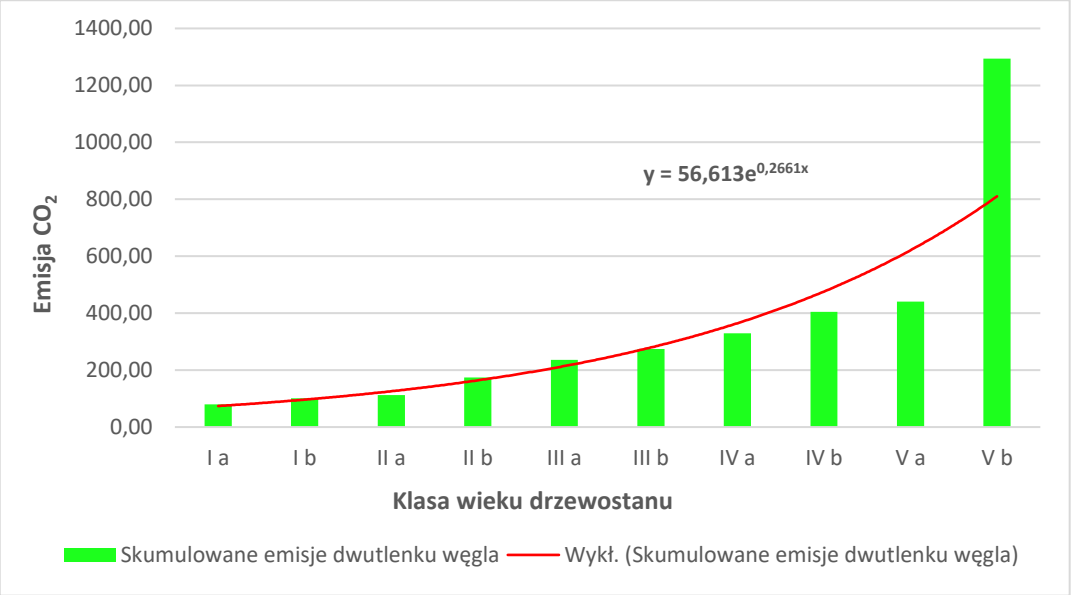
Największą emisję CO_2 zaobserwowano w przypadku Cięć rębnych, która wyniosła 743,75 kg/ha (ryc. 13). To ponad 7-krotnie więcej niż w przypadku Rozdrabniania pozostałości zrębowych (110,13 kg/ha) - zabiegu z największą emisją CO_2 poza Cięciami rębnymi.



Ryc. 13. Emisja dwutlenku węgla podczas realizacji zabiegów technologicznych

Skumulowane emisje dwutlenku węgla (Em_J) w zabiegach technologicznych na przestrzeni całej kolei rębu drzewostanu

Skumulowana emisja dwutlenku węgla w 13 zabiegach technologicznych wyniosła 1294,40 kg/ha (ryc. 14). W zakresie wykonywania zabiegów trzebieży wczesnych i późnych (od TW 21-30 do TP 81-90) zaobserwowano emisję CO_2 na poziomie 339,90 kg/ha, co stanowiło ponad 26 % całkowitej emisji CO^2 dla zabiegów w całej kolei rębu.



Ryc. 14. Skumulowane emisje dwutlenku węgla zabiegów technologicznych w całej kolei rębu w przeliczeniu na 1 ha

Uogólnienia i wnioski

Czas pracy, pracochłonność i wydajność operacyjna

1. W zabiegach technologicznych z pozyskaniem drewna (trzebieże wczesne, trzebieże późne i cięcia rębne) operacyjny czas pracy oraz pracochłonność operacji ścinki z okrzesywaniem i przerzynką zależał głównie od pierśnicy obrabianych drzew. W przypadku operacji zrywki czas pracy oraz pracochłonność były uzależnione przede wszystkim od odległości, na jaką zrywano drewno.
2. Spośród wszystkich analizowanych zabiegów technologicznych w całej kolei rębu najwyższą pracochłonnością a jednocześnie najniższą wydajnością w przeliczeniu na 1 ha, wyróżniał się zabieg Cięć rębnych, co spowodowane było złożonością prac na zrębie, ilością operacji technologicznych do wykonania oraz największą ilością drewna do pozyskania w porównaniu do pozostałych zabiegów.
3. Porównując zabiegi technologiczne trzebieży w kolei rębu stwierdzono, że przy stosowaniu tej samej technologii (ręczno-maszynowej) wydajność pozyskania surowca drzewnego rośnie wraz z wiekiem drzewostanu. Potwierdziła to analiza statystyczna dla pracochłonności operacji ścinki z okrzesywaniem i przerzynki, wyrażonej w h/m^3. Wzrost ten wynikał z coraz większych dymensji drzew oraz malejącego ugałęzienia w kolejnych dziesięcioleciach.
4. Pracochłonność operacji zrywki dla ujednoliconej średniej odległości zrywki (623 metry) w zabiegach technologicznych z pozyskaniem drewna w odniesieniu na 1 m^3, była uzależniona od koncentracji surowca przy szlaku zrywkowym oraz umiejętności operatora. Najniższe wartości pracochłonności, a tym samym najwyższe wydajności, uzyskano w ostatnim zabiegu trzebieży (TP 81-90) oraz w Cięciach rębnych ze względu na dużą koncentrację surowca oraz wyższe umiejętności operatora niż w pozostałych zabiegach.

Energochłonność operacji technologicznych i emisje CO_2

5. Kulminacja nakładów energetycznych w zabiegach technologicznych przeprowadzonych na przestrzeni całej kolei rębu drzewostanu, przypadała na zabieg Cięć rębnych, zarówno pod względem energii wbudowanej w maszynę jak i energii zawartej w paliwie. Spowodowane to było zastosowaniem maszyn wielooperacyjnych, dla których zarówno jednostkowa energia zużyta przy procesie produkcji maszyny jak i energia zawarta w spalonym paliwie, były najwyższe w odniesieniu do maszyn zastosowanych w pozostałych zabiegach.
6. Największe wartości wydatku energetycznego operatora uzyskano w przypadku operacji technologicznych z dużym udziałem czynności manualnych operatora: operacje realizowane przy użyciu pilarki spalinowej (ścinka z okrzesywaniem i przerzynką w czyszczeniach

oraz trzebieżach) czy sadzenie ręczne (kostur Huffa). Najniższe wartości uzyskano podczas operacji technologicznych, w których stosowano ciągniki rolnicze lub maszyny wielooperacyjne (ścinka z okrzesywaniem i przerzynką w Cięciach rębnych, zrywka surowca).

7. Rozpatrując wydatek energetyczny operatora w operacjach z pozyskaniem surowca, w przeliczeniu na 1m^3 surowca (trzebieże i Cięcia rębne) stwierdzono wyraźną tendencję malejącą wraz z wiekiem drzewostanu. Wynikała ona przede wszystkim z coraz krótszego czasu operacyjnego przy ścince z okrzesywaniem i przerzynką wraz z rosnącym wiekiem drzewostanu, a w efekcie malejącą pracochłonność.
8. Największy udział w całkowitej energochłonności zabiegu technologicznego, miała energia zawarta w paliwie (średnio dla każdego z 13 zabiegów: 75,81%), w dalszej kolejności energia wbudowana w maszynę (średnio 15%), a najmniejszym udziałem charakteryzował się wydatek energetyczny operatora (średnio 9,19%).
9. Pod względem udziału poszczególnych rodzajów energii w energochłonności operacji ścinki z okrzesywaniem i przerzynką, w zabiegach technologicznych z pozyskaniem drewna (w odniesieniu na 1m^3 surowca) największy udział miała energia zawarta w paliwie (średnio 90,96%), następnie energia wbudowana w maszynę (średnio 4,68%), z kolei najmniejszym udziałem charakteryzował się wydatek energetyczny operatora (średnio 4,36%).
10. Rozpatrując udział poszczególnych rodzajów energii w energochłonności operacji zrywki, w zabiegach technologicznych z pozyskaniem drewna (w odniesieniu na 1m^3 surowca) największy udział miała energia zawarta w paliwie (średnio 73,19%), w dalszej kolejności energia wbudowana w maszynę (średnio 26,72%), z kolei najmniejszym udziałem charakteryzował się wydatek energetyczny operatora (średnio 0,08%).
11. Maksimum emisji dwutlenku węgla (CO_2) wyrażonej w kg/ha, przypadało na zabieg technologiczny Cięć rębnych, spośród wszystkich zabiegów w całej kolei rębu. Wielkość emisji CO_2 w analizowanych operacjach technologicznych, uzależniona była od ilości spalonych paliw i olejów przez maszyny zaangażowane w realizację operacji. Wartość emisji CO_2 w zabiegach technologicznych z pozyskaniem drewna wyrażona w kg/m^3, również osiągnęła maksimum w zabiegu Cięć rębnych.
12. Gdyby przyjąć przedstawiony w pracy układ trzynastu typowych zabiegów technologicznych, składających się na cały cykl życiowy drzewostanu, całkowity nakład pracy nad zabiegami wyniósłby 145,29 h/ha, całkowita energochłonność zabiegów wyniosłaby 21 770,61 MJ/ha, a skumulowana emisja dwutlenku węgla podczas realizacji zabiegów kształtowałaby się na poziomie 1 294,40 kg/ha.

Bibliografia

ATHANASSIADIS D., LIDESTAV G., WASTERLUND I. (1999): Fuel, hydraluic oil and lubricant consumption in Swedish mechanized harvesting operations, 1996. J Forest Eng 1999;10(1):59-66.

ATHANASSIADIS D., LIDESTAV G., NORDFJELL T. (2002): Energy use and emissions due to manufacture of a forwarder. Resources, Conservation and Recycling 34 (2002) 149-160. Elsevier.

AXELSSON S.Ǎ., PONTÈN B. (1990): New ergonomic problems in mechanised logging opertions. Int J Indust Ergon 1990; 5: 267-273.

BIURO URZĄDZANIA LASU I GEODEZJI LEŚNEJ (2008): Oddział w Poznaniu. Plan urządzenia lasu Nadleśnictwa Grodziec na okres 1.01.2008 – 31.12.2017.

CHMIELEWSKI S. (2008): Praca doktorska. Waloryzacja wybranych metod pozyskiwania i zrywki drewna w drzewostanach sosnowych młodszych klas wieku. Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.

CZURAJ M., RADWAŃSKI B., STRZEMESKI S. (1960): Tablice miąższości drzew stojących. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne. Warszawa.

CZURAJ M. (1997): Tablice zasobności i przyrostu drzewostanów opracowane na podstawie wyników pomiarowych badań polskich, niemieckich, radzieckich i holenderskich dla gatunków drzew leśnych naszej strefy geograficznej. Wydawnictwo Świat. Warszawa.

DŁUGOSIEWICZ L., GRZEBIENIOWSKI W. (2009): Porównanie wybranych technologii pozyskania drewna pod względem wydajności i kosztów. Inżynieria Rolnicza 8(117)/2009.

DYREKCJA GENERALNA LASÓW PAŃSTWOWYCH (2015): Lasy Państwowe w liczbach 2015. Wyd. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych. Warszawa.

GOODNIGHT J. H. (1980): Tests of hypotheses in fixed effects linear models. Commun. Stat. Theory and Methods, Vol 9, 167 – 180.

KRUSKALL W. H., WALLIS W. A. (1952): Use of ranks in one-criterion variance analysis. J. Amer. Statist. Ass., 4.7, 583-621.

NORMA BRANŻOWA BN-76/9195-01. (1976): Maszyny rolnicze. Podział czasu pracy. Symbole i określenia. Wydawnictwa Normalizacyjne. Warszawa.

NUREK T. (2005): Badania organizacji pracy nowoczesnych maszyn do pozyskiwania drewna – model matematyczny. W: Procesy produkcyjne w leśnictwie – technika, technologia, organizacja. Red. J. Więsik. Wyd. SGGW, Warszawa: 63-73.

SCHWAIGER H., ZIMMER B. (2001): Energy, Carbon and Other Material Flows in the Life Cycle Assessment of Forestry and Forest Products. A comparison of fuel consumption and greenhouse gas emissions from forest operations in Europe. European Forest Institute. Discussion paper 10.2001.

SOWA J. M. (2009): Współczesne pożytki z lasu. W: Leśnictwo w górach i regionach przemysłowych. Red. J. Starzyk. Wyd. UR, Kraków: 129-152.

STEMPSKI W., GRODECKI J. (2007): Wydajność i wydatek energetyczny robotników w trzebieży drzewostanów sosnowych [Productivity and physical work load of workers in late thinnings in pine stands]. In: Technika i technologia w leśnictwie polskim. Wyd. SGGW Warszawa. 95-99 [in Polish].

SYSTEM INFORMACYJNY LASÓW PAŃSTWOWYCH [SILP] (1995): Zakład Informacyjny Lasów Państwowych.

SZEWCZYK G. (2012): Sekwencyjność operacji zrywki w drzewostanach trzebieżowych i poklęskowych. Nauka Przyr. Technol. 6, 3, #51.

WAŻYŃSKI B. (2008): Podstawy gospodarki leśnej. Wydawnictwo Wszechnicy Mazurskiej Acta Universitatis Masuriensis. Olecko.

ŻUREK W., CISZAK O., CIEŚLAK R., SUSZYŃSKI M. (2007): Dobór metod badania czasu pracy w procesie montażu. Technologia i automatyzacja montażu. 2 i 3/2007.

Odwołania do stron internetowych:

- https://poznan.lasy.gov.pl
- https://www.123rf.com
- http://www.gettyimages.com