

**AUTOREFERAT**  
**Opis dorobku i osiągnięć naukowych**

dr inż. Arkadiusz Gendek  
Szkola Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
w Warszawie  
ul. Nowoursynowska 164  
02-787 Warszawa  
e-mail: [arkadiusz\\_gendek@sggw.pl](mailto:arkadiusz_gendek@sggw.pl)

Warszawa 2019

## **1. Imię i nazwisko**

Arkadiusz Piotr Gendek

## **2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe**

1991 – dyplom technika leśnika w zakresie gospodarki leśnej. Technikum Leśne im. Romana Gesinga w Zagnańsku.

1997 – tytuł magistra inżyniera mechanizacji leśnictwa uzyskany na Wydziale Techniki Rolniczej i Leśnej SGGW w Warszawie. Temat pracy dyplomowej: „Badanie wpływu wielkości pilarki na zagrożenie operatora podczas pracy w cięciach rębnych”.

Promotor: prof. dr hab. Jerzy Więsik

2005 – stopień doktora nauk rolniczych w zakresie inżynierii rolniczej nadany przez Radę Wydziału Inżynierii Produkcji. Temat rozprawy: „Wpływ parametrów sprzęgła na wydajność skrawania drewna pilarką spalinową”

Promotor: Prof. dr hab. inż. Jerzy Więsik

Recenzenci: prof. dr hab. Henryk Różański, Akademia Rolnicza im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu, dr hab. Janusz Szyber, SGGW w Warszawie

### ***Studia podyplomowe:***

1998 – Równoległe Studium Pedagogiczne przy Wydziale Ekonomiczno-Rolnym Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego.

2011 – Studia podyplomowe „Wykorzystanie biomasy na cele energetyczne”, Akademia Rolnicza w Krakowie. Temat pracy dyplomowej „Symulacja procesu pozyskiwania pozostałości zrębowych przeznaczonych na cele energetyczne”

Promotor: dr inż. Krzysztof Mudryk

Recenzent: prof. dr hab. Jarosław Frączek

## **3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych**

1997 - 2000 – asystent w Zakładzie Mechanizacji Leśnictwa na Wydziale Techniki Rolniczej i Leśnej SGGW w Warszawie

2000 – 2007 – asystent w Zakładzie Mechanizacji Leśnictwa, Katedra Maszyn Rolniczych i Leśnych, Wydział Inżynierii Produkcji SGGW w Warszawie

od 2007 – adiunkt w Zakładzie Mechanizacji Leśnictwa, Katedra Maszyn Rolniczych i Leśnych, Wydział Inżynierii Produkcji SGGW w Warszawie



- 5) **Gendek A.**, Wężyk P., Moskalik T. 2018. Udział oraz dokładność szacowania pozostałości zrębowych w ogólnej masie pozyskanego drewna. Sylwan 162 (8): 679-687.  
Punktacja MNiSW: 15 pkt IF: 0,623 Udział autora: 70%  
*Mój wkład dotyczył opracowania koncepcji i metodyki, pozyskania danych w badaniach terenowych, przeglądzie literatury, analizie wyników oraz przygotowania pracy w formie publikacji, przeprowadzenia przez etap recenzji.*
- 6) **Gendek A.**, Małaćák J., Velebil J. 2018. Wpływ technologii pozyskania i składu zrębków leśnych na ich wartość opałową i zawartość popiołu. Sylwan 162(3): 248-257.  
Punktacja MNiSW: 15 pkt IF: 0,623 Udział autora: 70%  
*Mój wkład dotyczył opracowania koncepcji i metodyki, przeglądzie literatury, pozyskaniu i przygotowaniu materiału badawczego, analizie wyników, przygotowania pracy w formie publikacji, przeprowadzenia przez etap recenzji.*
- 7) **Gendek A.**, Nurek T., Zychowicz W., Moskalik T. 2018. Effects of intentional reduction in moisture content of forest wood chips during transport on truckload price. BioResources 13(2): 4310-4322. DOI: 10.15376/biores.13.2.4310-4322  
Punktacja MNiSW: 35 pkt IF: 1,202 Udział autora: 50%  
*Mój wkład dotyczył współudziału w opracowaniu koncepcji i metodyki, przeglądzie literatury, analizie wyników, przygotowaniu pracy w formie publikacji, przeprowadzeniu przez etap recenzji.*

**c) Omówienie prac wchodzących w skład osiągnięcia naukowego.**

Obecnie uważa się, że energia zgromadzona w biomasie jest podstawowym środkiem dla złagodzenia zmian klimatycznych i zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego w Europie i na świecie. Jednocześnie postęp naukowy i techniczny prowadzi do coraz efektywniejszego wykorzystania zasobów biomasy do produkcji energii, w tym biomasy leśnej.

Na przełomie XX i XXI wieku, kiedy intensywnie rozpoczęto wykorzystywać paliwa stałe z biomasy, badania naukowe skupiały się przede wszystkim na rozwoju technologii, doborze maszyn i poprawie efektywności łańcucha dostaw. Obecnie zmieniło się podejście i prowadzone badania skupiają się na zwiększeniu wydajności pracy oraz na jakości uzyskanego produktu. Parametry produktu powinny być dostosowane wielkością do wymagań zakładów energetycznych zarówno pod kątem urządzeń podawczych jak i pod kątem parametrów procesu spalania. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że w biomasie leśnej – a przede wszystkim w pozostałościach zrębowych i produkowanych z nich zrębkach – znajduje się często stosunkowo dużo zanieczyszczeń mineralnych wpływających na jej parametry energetyczne.

Pozostałości zrębowe i produkowane z nich zrębki, są obecnie jednym z najpowszechniej wykorzystywanym przez przemysł energetyczny źródłem energii odnawialnej w Polsce. W skład pozostałości zrębowych wchodzić mogą nie tylko okrzese gałęzie, wierzchołki drzew ale mogą się tam znajdować również krzewy z podszytu i niespełniające wymagań klasyfikacji jakościowo-wymiarowej kawałki drewna okrągłego. Pozostałości powstają jako

produkt uboczny w czasie procesu pozyskiwania drewna w drzewostanach rębnych (zręby) oraz w drzewostanach przedrębnych (trzebieże) i zaliczane są do drewna małowymiarowego. W przypadku biomasy leśnej pochodzącej z pielęgnacji drzewostanów młodszych klas wieku (czyszczenia) ze względu na ich ilość oraz zagęszczenie drzew na powierzchni, pozostałości zazwyczaj nie pozyskuje się.

Udział pozostałości zrębowych w ogólnej masie pozyskiwanego drewna jest zróżnicowany i w zależności od warunków wynosi od ok. 7% do ok. 17% (średnio 11%). Bazując na danych dotyczących pozyskania grubizny w LP na poziomie 42 mln m<sup>3</sup> rocznie, pozostałości stanowią 2,9 do 7,1 mln m<sup>3</sup> (średnio 4,6 mln m<sup>3</sup>). Dane literaturowe podają, że na cele energetyczne w Polsce pozyskuje się rocznie ok 2 mln m<sup>3</sup> co oznacza, że istnieje jeszcze niewykorzystany potencjał. Wynika stąd potrzeba prowadzenia badań nad ich ilością i jakością pod kontem jak najlepszego wykorzystania.

W światowej literaturze dobrze rozpoznany jest problem doboru maszyn, ich parametrów w procesie zrębkowania, poprawie efektywności łańcucha dostaw czy parametrów fizycznych i energetycznych uzyskiwanych zrębków. W literaturze polskiej, badania oparte są głównie o pozyskanie biomasy rolniczej (plantacje roślin energetycznych), która różni się od leśnych pozostałości zrębowych i produkowanych z nich zrębków. Inne są również maszyny i stosowane technologie.

Zarówno polska jak i światowa literatura pomija problem związany z szacowaniem ilości pozostałości zrębowych na powierzchniach leśnych i związanych z tym szacowaniem błędów. Stwierdzono również braki w wiedzy dotyczącej powiązania technologii pozyskiwania zrębków leśnych z ich parametrami energetycznymi, jak również braki w informacjach dotyczących relacji pomiędzy dostawcą zrębków a odbiorcą jakim jest zakład energetyczny.. Niedostateczne są też informacje na temat możliwości i sposobów polepszania jakości zrębków. Należy wspomnieć, że nie zawsze można odnieść wyniki uzyskiwane w innych krajach do warunków polskich

W związku z powyższym, celem wszystkich moich badań przedstawionych w publikacjach do oceny dorobku naukowego, było oszacowanie ilości pozostałości zrębowych na powierzchniach leśnych i określenie błędów szacowania, powiązanie technologii pozyskiwania zrębków leśnych przeznaczanych na cele energetyczne z ich jakością oraz wskazanie sposobów na uzyskanie jak najlepszych parametrów energetycznych.

Wskazane publikacje łączą ze sobą materiał, metody oraz procedury badawcze opisane w normach i dostępnej literaturze przedmiotu. We wszystkich przypadkach materiał do badań stanowiła biomasa leśna w postaci pozostałości zrębowych o różnym składzie gatunkowym i wytworzone z nich zrębki leśne. Pozyskanie prowadzone było na powierzchniach leśnych zlokalizowanych w północno-wschodniej Polsce przez dużą firmę leśną posiadającą niezbędne wyposażenie techniczne (rębarki mobilne Bruks, forwardery., ciągniki rolnicze z przyczepami do zrywki drewna, ciągniki siodłowe z naczepami do transportu zrębków i drewna okrągłego) dostarczającą rocznie 20-25 tys. ton zrębków do trzech dużych zakładów energetycznych.

Biomasa leśna może być transportowana do zakładów energetycznych w różnej postaci. W polskich warunkach najczęściej występuje w postaci sypkiej czyli w postaci zrębków. Istnieje również możliwość transportowania pozostałości zrębowych w postaci pakietów lub nierozdrobnionych gałęzi i wierzchołków drzew. Transportowana postać zależy w dużej

mierze od jej ilości, odległości transportu, infrastruktury drogowej, dostępnych pojazdów czy wymagań odbiorcy końcowego. Główną wadą biomasy leśnej w postaci nierozdrobnionej jest duża objętość i niska gęstość nasypowa, co przekłada się na to, że pojazdy nie wykorzystują swojej maksymalnej ładowności.

W Polsce stosuje się głównie trzy technologie pozyskiwania zrębków i dostarczania ich do zakładów energetycznych. Pierwsza zakłada poruszanie się rębarki po powierzchni zrębu lub wewnątrz drzewostanu, zrębkowanie pozostałości do kosza rębarki, przejazd do drogi leśnej, przeładunek do naczepy samochodu wywozowego i wywóz do odbiorcy. Druga zakłada zrywkę pozostałości z powierzchni leśnej forwarderem lub ciągnikiem z przyczepą do drogi leśnej, ułożenie stosów gałęzi, zrębkowanie ze stosu do kosza rębarki, przeładunek zrębków na samochód wywozowy i wywóz do odbiorcy. Trzecia, najrzadziej stosowana zakłada pakietowanie pozostałości na powierzchni leśnej, zrywkę pakietów do drogi leśnej i ułożenie ich w stosy, wywóz pakietów do odbiorcy, zrębkowanie na placu u odbiorcy. We wszystkich przypadkach pozostałości zrębowe mają kontakt z glebą.

Niezależnie od stosowanej technologii ważne jest ustalenie poprawnych relacji pomiędzy uczestnikami całego procesu dostaw zrębków od momentu pozyskiwania drewna (Lasy Państwowe, Nadleśnictwo) poprzez uprzążanie powierzchni, rozdrabnianie pozostałości i transport zrębków (producent/dostawca) po odbiór zrębków, kontrolę ich jakości i rozliczenie z dostawcą (odbiorca końcowy / zakład energetyczny).

Produkcja zrębków z pozostałości zrębowych niesie za sobą wiele problemów, gdzie za najważniejsze z nich należy uznać duży stopień ich rozproszenia na powierzchniach leśnych, niewielkie pozyskanie z jednostki powierzchni oraz duży udział części zielonych. Główne parametry charakteryzujące zrębki z pozostałości zrębowych pod względem energetycznym to wilgotność w zakresie 45-60% (materiał w stanie świeżym), wartość opałowa 18-20 MJ/kg (suchej substancji), zawartość popiołu 1-3%, gęstość usypowa 110-400 kg/m<sup>3</sup>. Początkowa wilgotność zrębków, pozyskiwanych na powierzchniach leśnych i transportowanych do zakładów energetycznych może zawierać się od ok. 30% do ok. 62%, co przekłada się bezpośrednio na ich wartość opałową. Dla zrębków mokrych (50-60%) wartość opałowa wynosi 6-8 MJ/kg, natomiast po podsuszeniu do stanu powietrznie-suchego (10-20%) wzrasta do poziomu 14-16 MJ/kg, a przy całkowitym wysuszeniu do ok. 19 MJ/kg.

Parametrami jakościowymi zrębków leśnych, które uwzględniane są przy rozliczeniu pomiędzy dostawcą a zakładem energetycznym są wartość opałowa, wilgotność i zawartość popiołu. Duża wilgotność zrębków niekorzystnie wpływa na ich przechowywanie jak również jest niekorzystna dla dostawców w przypadkach rozliczenia za wartość energetyczną. Wymaga również stosowania dodatkowych i kosztownych procesów suszenia. W przypadku różnych technologii pozyskiwania zrębków na powierzchniach leśnych, pozostałości zrębowe zazwyczaj przelegują na nich przez kilka miesięcy, naturalnie tracąc nadmiar wody.

Ważnym elementem w łańcuchu produkcji i dostaw zrębków leśnych do zakładu energetycznego jest dostosowanie materiału do wymogów odbiorców zarówno pod kątem urządzeń podawczych jak i pod kątem parametrów procesu spalania. Oprócz wspomnianych już wilgotności i wartości opałowej bierze się pod uwagę wielkość zrębków i rozkład frakcyjny. Wielkość zrębków może mieć wpływ na ich wzajemne ułożenie względem siebie, wypełnianie wolnych przestrzeni, przepływ powietrza między nimi, a w powiązaniu z wilgotnością wpływa również na masę transportowanego ładunku. Zakłady energetyczne

ustalają własne wymagania jakie powinien spełniać dostarczony materiał: wartość opałowa min. 7 MJ/kg, wilgotność maksymalna 50-60%, zawartość popiołu maksymalna 5% (dane z przykładowego zakładu).

Z punktu widzenia odbiorców zrębków (elektrowni, elektrociepłowni) najważniejszym parametrem jakościowym surowca jest wartość opałowa związana bezpośrednio z jego wilgotnością i zawartością popiołu. Te z kolei uzależnione są od warunków atmosferycznych oraz w dużej mierze od pory roku, w której pozyskano i zrębkowano materiał. Cena jaką chcą płacić odbiorcy zrębków jest pochodną tych właśnie parametrów.

### **Udział i dokładność szacowania ilości pozostałości zrębowych na powierzchni leśnej**

Bazując na danych ze 164 powierzchni leśnych, na których w latach 2013-2017 prowadzone było pozyskiwanie drewna, określony został udział pozostałości zrębowych w biomase leśnej oraz błędy popełniane przez leśniczych przy szacowaniu ich ilości.

Udział pozostałości zdefiniowany został jako stosunek miąższości sprzedanych pozostałości zrębowych do miąższości pozyskanego drewna wielko- i średniowymiarowego (W+S). Błąd szacowania pozostałości określony został jako różnica pomiędzy miąższością pozostałości zrębowych oszacowaną przez leśniczego i wystawioną do sprzedaży a miąższością pozostałości sprzedanych z danej powierzchni leśnej. Ujemny błąd oznaczał niedoszacowanie przez leśniczego masy pozostałości zrębowych, czyli wystawiono do sprzedaży mniej, niż wynikało to z rozliczenia końcowego. Błąd dodatni oznaczał przeszacowanie.

Przeprowadzone badania (**Gendek i in., 2018c**) wykazały, że średnia miąższość pozostałości zrębowych pozyskiwanych z powierzchni 1 ha wynosi  $37,7 \text{ m}^3 \pm 14,4 \text{ m}^3/\text{ha}$  i dla poszczególnych analizowanych zasięgów leśnictw zawierała się w zakresie  $29,0 \div 58,8 \text{ m}^3/\text{ha}$ . W stosunku do masy grubizny (W+S) stanowi to  $11,3 \pm 3,9\%$ . W poszczególnych leśnictwach udział ten jest zróżnicowany wahając się od 9,12 do 17,36%. Udział pozostałości zrębowych w znacznym stopniu zależy od typu siedliskowego lasu. Wyniki uzyskane z analizowanych drzewostanów wskazują, że udział ten wzrasta wraz z żyznością siedliska. W LMśw wyniósł on średnio 13,3%; a w BMśw 10,5%. Przedstawione w publikacji wyniki poszerzają wiedzę na temat ilości pozostałości zrębowych na powierzchniach leśnych.

W analizowanych leśnictwach, średni błąd szacowania pozostałości zrębowych wyniósł (minus) -6,1%. Oznacza to, że pracownicy administracji leśnej (leśniczowie), ogólnie nie doszacowują ilości pozostałości na powierzchniach po zrębie. Nie można jednocześnie wskazać jednoznacznej przyczyny związanej z popełnianymi błędami. Biorąc pod uwagę wszystkie rozpatrywane powierzchnie i ich wielkość, stwierdzono, że na błąd szacowania nie wpływa wielkość powierzchni, na której wykonywane są prace zrębowe. Na pojedynczych powierzchniach występuje duży rozrzut błędów. Zaobserwowano jednak, że dla pojedynczej powierzchni nie pojawiają się przypadki niedoszacowania udziału pozostałości zrębowych poniżej -40%, występują jednak błędy przeszacowania dochodzące do +54,2%.

Wnioski z przeprowadzonych analiz wskazują, że dla producentów zrębków mających podpisane kontrakty na dostawę z zakładami energetycznymi, ważne jest aby błąd szacowania pozostałości był jak najmniejszy, a przede wszystkim, żeby szacunki leśniczego nie były zawyżone w stosunku do rzeczywistej masy pozostałości na powierzchni leśnej. Jest to związane m.in. z wywiązywaniem się z zawartych kontraktów z elektrociepłowniami. Z

punktu widzenia firm leśnych produkujących zrębki z pozostałości zrębowych i planowania rytmiczności dostaw, poziom założonych błędów dla pojedynczych powierzchni powinien być mniejszy.

Przyjęte przez Lasy Państwowe wartości brzegowe ( $\pm 40\%$ ) błędów szacowania udziału pozostałości zrębowych są duże. Przedsiębiorcy uprzętający powierzchnie z pozostałości zrębowych (zazwyczaj poprzez zrębkowanie) już na etapie planowania prac muszą uwzględniać strategię działań jednostek biorących udział w procesie przepływu drewna. Na podstawie ustalonych z odbiorcą końcowym terminów i ilości biomasy muszą oni dopasować trasy oraz liczby maszyn i pojazdów do obsługi danego zadania. Przedsiębiorca nie powinien skupiać się na przemieszczaniu maszyn do zadań położonych w sąsiednim lub bardziej odległym kompleksie leśnym, ale na wykonaniu pracy w miejscu gdzie biomasa została precyzyjnie oszacowana.

Stwierdzono również, że w celu zwiększenia dokładności szacowania ilości pozostałości zrębowych na poszczególnych powierzchniach leśnych, należy opracować odpowiednie modle matematyczne wykorzystujące parametry określane automatycznie, stosując na szeroką skalę technologie skanowania laserowego drzewostanów, fotogrametrii oraz teledetekcji.

Określenie błędów szacowania pozostałości leśnych na powierzchniach gdzie prowadzone jest pozyskiwanie drewna jest znaczącym wkładem w uzupełnienie wiedzy, która była pominięta w dostępnej literaturze.

### **Cechy fizyczne i energetyczne zrębków z leśnych pozostałości zrębowych a technologia pozyskiwania**

Dotychczasowe ustalenia wskazują, że gęstość nasypowa zrębków leśnych w zależności od ich wilgotności, składu i pochodzenia zawiera się najczęściej w granicach od ok. 110 do ok. 340 kg/m<sup>3</sup>.

Pomiary gęstości nasypowej zrębków (**Gendek i in., 2016**) przeprowadzone zostały na powierzchniach leśnych w drzewostanach mieszanych z przewagą świerka i sosnowych. Rozdrabnianie pozostałości zrębowych prowadzono samojezdną rębarką Bruks 805 CT z zasobnikiem o różnym stopniu zaostrenia noży (ostry i stępiony). Do badań użyto autorskiego mobilnego stanowiska z naczyniem pomiarowym wykonanym zgodnie z odpowiednią normą. Pomiary prowadzono bezpośrednio na powierzchni leśnej. Z każdego kolejnego zasobnika rębarki (20 m<sup>3</sup> zrębków) pobieranych było losowo po 10 próbek o objętości 0,05 m<sup>3</sup>. Wymiana noża następowała po wykonaniu ok. 60-120 m<sup>3</sup> zrębków. Średnia wilgotność zrębków dla badanych powierzchni wynosiła ok. 30%, co uznano za niską wartość. Zrębki takie miały szacunkową wartość opałową ok. 12-13 MJ/kg.

Przeprowadzone analizy wykazały (**Gendek i in., 2016**), że niższą gęstość nasypową uzyskuje się podczas rozdrabniania pozostałości rębarką z nożami tępymi, a wyższą nożami ostrymi. W przypadku rozdrabniania nożami ostrymi skład gatunkowy drzewostanu nie ma wpływu na gęstość nasypową, która średnio w odniesieniu do suchej substancji wyniosła 166 kg/m<sup>3</sup>. Podczas zrębkowania nożami tępymi, skład gatunkowy wpływa na uzyskiwaną gęstość nasypową, która wyniosła średnio 155 kg/m<sup>3</sup> w drzewostanie mieszanym i 160 kg/m<sup>3</sup> w drzewostanie sosnowym.



Wnioski z badań sprowadzają się do stwierdzeń, że rozdrabniając pozostałości nożami tępyimi, skład gatunkowy drzewostanu i co z tym związane skład gatunkowy pozostałości zrębowych wpływa na gęstość nasypową zrębków. W przypadku noży ostrych skład gatunkowy nie ma znaczenia. Wyższa gęstość nasypowa zrębków sosnowych może być związana z większą ilością drewna i mniejszą ilością części zielonych zawartych w pozostałościach zrębowych czyli odwrotnie niż w przypadku drzewostanu z przewagą świerka. Zaleca się aby operator jak najczęściej i najdłużej pracował nożami ostrymi. Uzyskuje się wtedy najwyższą gęstość nasypową zrębków leśnych, co przełoży się na efektywniejsze wykorzystanie transportu (objętości przestrzeni ładunkowej) wymierne korzyści finansowe z tym związane.

Uzyskane wyniki poszerzyły dostępną wiedzę i zostały wykorzystane w badaniach dotyczących transportu zrębków do zakładów energetycznych (**Gendek i in., 2018b**) oraz przy określaniu ekonomicznych skutków zmian parametrów energetycznych zrębków leśnych (**Gendek i Nurek, 2016**).

Dostarczany do zakładów energetycznych materiał w postaci zrębków z leśnych pozostałości zrębowych musi spełniać minimalne wymagania jakie stawia zakład (**Gendek i Nurek, 2016**). W związku z tym, że wartość opałowa zrębków i zawartość popiołu są podstawowymi parametrami oceny jakościowej uwzględnianymi przez zakłady energetyczne przy rozliczeniach z dostawcą, celowe było określenie wartości tych parametrów i powiązanie ich z technologią pozyskania (**Gendek i in., 2018a**).

Początkowe badania (**Gendek i Zychowicz, 2014**) dotyczyły określania wartości opałowej zrębków produkowanych z materiału drzewnego w postaci pozostałości zrębowych i drewna okrągłego. Rozdrabnianiu poddane zostały pakiety świerkowe, sosnowe pozostałości zrębowe z dodatkiem podszytu liściastego, średniowymiarowe drewno dębowe oraz mieszanka średniowymiarowego drewna olchowego z pozostałościami świerkowymi.

Pomiar ciepła spalania wykonany był metodą kalorymetryczną, wyniki zgodnie z normą PN-ISO 1928:2002 przeliczone zostały na wartość opałową.

W przypadku zrębków wykonanych z pakietowanych pozostałości świerkowych uzyskano średnią wartość opałową suchej substancji 14,6 MJ/kg, co jest wartością o ok 4 MJ/kg niższą od minimalnej wartości opałowej podawanej w literaturze dla drewna świerkowego. Należy przy tym uwzględnić fakt, że w pakietach znajduje się nie tylko drewno ale również kora, igliwie oraz różne zanieczyszczenia pobierane w czasie pakietowania pozostałości zrębowych. Stwierdzono, że podobna zależność jak w przypadku zrębków z pakietów świerkowych występuje w zrębkach mieszanych drewna olchowego z pozostałościami świerkowymi – uzyskano wartość opałową 16,6 MJ/kg, która jest niższa niż wartość opałowa czystego drewna olchowego i drewna świerkowego.

Dla zrębków wykonanych z drewna dębowego (18,6 MJ/kg) oraz pozostałości sosnowych z dodatkiem podszytu (19,5 MJ/kg) uzyskano wartość wyższą niż podawana w literaturze dla zrębków nieoczyszczonych. Stwierdzono zatem, że stanowią one produkt lepszej jakości pod względem energetycznym.

Wnioski z badań pozwoliły stwierdzić, że zrębki produkowane z pakietów świerkowych mają gorsze właściwości energetyczne. Może to mieć związek z ich składem i znajdującymi się w nich zanieczyszczeniami mineralnymi. Potwierdziły to kolejne badania (**Gendek i in.,**

**2018a)** dotyczące wpływu technologii na wartość energetyczną zrębków leśnych z pozostałości zrębowych.

W celu powiązania wartości opałowej zrębków leśnych z technologią ich pozyskiwania (**Gendek i in., 2018a**) materiał badawczy stanowiły cztery grupy zrębków wyprodukowane w różnych technologiach, przy czym pozostałości zrębowe rozdrabniane były tą samą rębarką Bruks 805CT. Analizie poddano:

- zrębki z rozdrobnionych sosnowych odpadów tartacznych, w składzie których były zrżyny z drewna średnio- i wielkowymiarowego. Zrębkowanie odbywało się po ok. 2 miesiącach od dostarczenia zrżynów z tartaku na plac odbiorcy;

- zrębki wytworzone na powierzchni zrębu zupełnego przez rozdrabnianie sosnowych pozostałości zrębowych, w skład których wchodziły gałęzie z igłami, wierzchołki drzew i niewymiarowe kawałki drewna okrągłego. Pozostałości zbierane były forwarderem z powierzchni leśnej i układane w stosy przy drodze wywozowej, gdzie następowało zrębkowanie. Rozdrabnianie wykonywane było ok. 4 miesiące po pozyskaniu;

- zrębki z pozostałości po cięciach pielęgnacyjnych, w których znajdowały się gałęzie i wierzchołki drzew jak również krzewy. Skład zrębków był wielogatunkowy z dużym udziałem gatunków liściastych. Zrębkowanie odbywało się na powierzchni leśnej, rębarka przemieszczała się po wyznaczonych szlakach technologicznych. Rozdrabnianie wykonywane było ok. 4 miesiące po pozyskaniu;

- zrębki z rozdrobnionych u odbiorcy pakietów świerkowych. W tej technologii, na powierzchni leśnej po usunięciu drzewostanu świerkowego, pozostałości (gałęzie, wierzchołki drzew) były pakietowane. Przygotowane pakiety (baloty) były zrywane do drogi wywozowej, a następnie transportowane na plac do odbiorcy. Zrębkowanie pakietów prowadzono po ok. 8 miesiącach sezonowania.

Najlepsze parametry energetyczne uzyskały zrębki z odpadów tartacznych. Zanotowano najwyższą wartość opałową. W tym przypadku zrębki miały największy udział czystego drewna, niewielki udział zanieczyszczeń i najmniejszy udział popiołu. Najniższą wartość opałową (16,3 MJ/kg) zanotowano dla zrębków wytworzonych z pakietów świerkowych. W tym przypadku zrębki były najbardziej zanieczyszczone (1,6%) i miały największy udział popiołu (3,9-11,4%). Potwierdzone zostało tym samym wnioskowanie przedstawione w publikacji **Gendek i Zychowicz (2014)**. Uzyskane wyniki pozwoliły na wyznaczenie zależności pomiędzy zawartością popiołu w zrębkach suchych a wartością opałową, co opisano równaniem liniowym.

Rozpatrując poszczególne technologie wytwarzania zrębków stwierdzono, że z energetycznego punktu widzenia najkorzystniejsze jest zrębkowanie odpadów tartacznych. Technologia ta nie jest jednak typowo leśna, ponieważ zrżyny tartaczne należy klasyfikować jako odpady z przemysłu drzewnego, a nie bezpośrednio z leśnictwa – zrębkowaniu poddawany jest produkt zawierający samo drewno z ewentualnie przylegającą do niego korą.

W pozostałych przypadkach, gdy zrębki pochodzą bezpośrednio z uprzątaných powierzchni leśnych i z rozdrabniania pozostałości zrębowych wskazano, że najlepsze są technologie, w których zrębkowanie odbywa się zarówno bezpośrednio w lesie, na powierzchni zrębu jak i po wcześniejszym ułożeniu pozostałości przy drodze w stosach. W tych technologiach wytworzone zrębki mają stosunkowo wysoką średnią wartość opałową

suchej substancji (17,9-18,1 MJ/kg) oraz stosunkowo niewielką zawartość popiołu (3,2-3,3%), która wynika z ilości zanieczyszczeń i udziału poszczególnych frakcji.

Najmniej korzystną jest technologia pakietowania pozostałości zrębowych, magazynowania ich przez okres kilku miesięcy i rozdrabniania pakietów przed transportem zrębków do zakładu energetycznego. W tym przypadku zarówno pozostałości zrębowe jak również wytworzone z nich pakiety mają kontakt z glebą na powierzchni leśnej. Zanieczyszczenia mineralne, które zostały przeniesione do głowicy pakieciarki w czasie podawania gałęzi, pozostają w pakietach do momentu ich rozdrabniania, przez co w momencie spalania zrębków występuje duża zawartość popiołu (średnio 5,84%). Popiół jak również deprecjacja drewna w czasie jego magazynowania przyczyniają się do obniżenia wartości opałowej.

Jako wniosek praktyczny, wskazano we wszystkich technologiach związanych z usuwaniem pozostałości zrębowych z powierzchni leśnych, że należy zwracać uwagę na pracę operatora. Podstawową przyczyną zanieczyszczenia zrębków jest zagłębianie chwytaka w glebę podczas podejmowania gałęzi i tym samym przenoszeniem zanieczyszczeń mineralnych do rębarki czy też pakieciarki.

Istotnym osiągnięciem z publikacji **Gendek i Zychowicz (2014)**, **Gendek i in. (2016)** jest stwierdzenie, że pakietowanie pozostałości zrębowych negatywnie wpływa na parametry energetyczne zrębków leśnych – zmniejsza wartość opałową, zwiększa ilość występujących w nich zanieczyszczeń i ilość popiołu.

Aby zapobiec zanieczyszczaniu pozostałości przy ich zbieraniu z powierzchni chwytakiem żurawia należy zastosować odpowiednio zaprojektowany chwytak, który nie będzie mógł zagłębiać się w glebę. Prace nad autorskim projektem takiego chwytaka są obecnie w realizacji.

### **Możliwość poprawy jakości zrębków leśnych poprzez zmianę ich parametrów energetycznych**

Zawartość wody w drewnie zmniejsza nie tylko jego wartość opałową, ale powoduje też obniżenie temperatury w palenisku, co zakłóca proces spalania. Podstawowym procesem związanym z przygotowaniem biomasy drzewnej (w tym zrębków leśnych) do spalania i poprawy jej parametrów jakościowych jest jej suszenie. Dodatkowym aspektem przemawiającym za zmniejszaniem wilgotności jest możliwość magazynowania zrębków w stosach, bowiem zrębki o wysokiej wilgotności szybciej ulegają deprecjacji.

Celem prowadzonych badań laboratoryjnych (**Gendek i Głowacki, 2009**) było określenie wpływu temperatury czynnika suszącego i opisanie dynamiki suszenia konwekcyjnego zrębków leśnych. Proces suszenia różnych materiałów roślinnych jest dobrze opisany w dostępnej literaturze, stwierdzono jednak braki w opisach dotyczących procesu suszenia zrębków leśnych w ich naturalnym składzie. Badania te miały przyczynić się do znalezienia sposobu poprawienia parametrów energetycznych zrębków.

Suszeniu poddane zostały zrębki sosnowe wytworzone rębarką Bandit Intimidator, pochodzące z 50-cio letniego drzewostanu sosnowego, w którym prowadzono cięcia pielęgnacyjne. Suszenie prowadzone było w suszarce tunelowej w kontrolowanych warunkach. Zastosowano temperatury 40, 50, 60, 70 i 80°C przy stałej prędkości przepływu czynnika suszącego równej 1,2 m/s. Wilgotność początkowa zrębków wynosiła 32-39%, co

jest zbliżone do średniej wilgotności zrębków dostarczanych do zakładów energetycznych opisanych w pracach przedłożonych do oceny dorobku **Gendek i Nurek (2016)** oraz **Gendek i in. (2018b)**.

Jak wykazały badania (**Gendek i Głowacki, 2009**) temperatura czynnika suszącego ma istotny wpływ na czas przebiegu procesu suszenia zrębków. Temperatura powietrza suszącego 40°C jest stosunkowo niska, co wymusza dłuższy przebieg suszenia. Suszenie materiału w temperaturach 50-80°C miało zbliżony charakter.

Analizując tempo oddawania wody we wszystkich przypadkach najistotniejsze jest pierwszych ok. 180 min kiedy to zrębki oddawały najwięcej wody. Była to istotna informacja z punktu widzenia odległości i czasu transportu zrębków z powierzchni leśnej do zakładu energetycznego uwzględniona w kolejnych badaniach **Gendek i Nurek (2016)**. W temperaturze suszenia 40°C nastąpił spadek wilgotności o ponad połowę z początkowych 38% do ok. 16%. We wszystkich analizowanych przypadkach dynamikę suszenia można opisać równaniami wykładniczymi. Uzyskane wyniki zostały wykorzystane w kolejnych badaniach dotyczących redukcji wilgotności zrębków leśnych w czasie ich transportu do zakładów energetycznych (**Gendek i in., 2018b**) oraz przy określaniu ekonomicznych skutków zmian parametrów energetycznych zrębków leśnych (**Gendek i Nurek, 2016**). Obecnie prowadzone przeze mnie badania symulacyjne zmniejszania wilgotności zrębków na autorskim stanowisku symulującym transport zrębków w naczepie zakładają wymuszony strumień czynnika suszącego o temperaturze 35-45°C.

Umowa pomiędzy odbiorcą (elektrociepłownia) a dostawcą zrębków (firma leśna wykonująca zrębkowanie) określa stawkę podstawową za dostarczenie 1 GJ energii. Ta wartość może być korygowana jedynie w dół, w sytuacji przekroczenia parametrów jakościowych dostarczonych zrębków. Parametrami tymi są: wartość opałowa, wilgotność, zawartość siarki, chloru oraz popiołu. Należy jednak zaznaczyć, że zakłady energetyczne określają wartość opałową zrębków przy określonej wilgotności w dniu dostawy. Za dostawę zrębków w danym dniu zostaje zapłacona kwota wynikająca jedynie z ich masy. Po określeniu ich rzeczywistej wilgotności, wartości opałowej i zawartości zbędnych substancji, cena jest korygowana, a rozliczenie końcowe ma miejsce przy kolejnej dostawie lub na koniec miesiąca. Stawka za dostarczony surowiec energetyczny nie zależy od odległości z jakiej został on dostarczony. Tę kwestię, o ile jest to możliwe, należy uwzględnić negocjując stawkę podstawową określaną w umowie.

Analizom poddane zostały dostawy zrębków do elektrociepłowni przez jedną firmę, w terminie od sierpnia 2013 do kwietnia 2015 (**Gendek i Nurek, 2016**). Materiał badawczy tak jak miało to miejsce we wcześniejszych analizach, stanowiły zrębki leśne pozyskiwane w trakcie uprzękania powierzchni zrębowych. Pozostałości były rozdrabniane w okresie 2-6 miesięcy po wykonaniu zrębu przy pomocy rębarek kontenerowych Bruks 805CT. Transport z powierzchni leśnych do oddalonego średnio o ponad 300 km zakładu energetycznego, odbywał się ciągnikami siodłowymi z naczepami o objętości 91 m<sup>3</sup>. Na podstawie analizy 186-ciu losowo wybranych transportów zrębków ustalono, że średnia odległość ich przewozu wyniosła 341 km i zawierała się w granicach od 188 do 499 km. Masa pojedynczego ładunku wynosiła ok. 22-23 Mg, co zostało zweryfikowane na podstawie gęstości nasypowej zrębków wyznaczonej w publikacji **Gendek i in. (2016)**.

Wykazano, że średnia wilgotność i wynikająca z niej wartość opałowa zrębków dostarczanych do zakładu energetycznego jest bezpośrednio związana z warunkami atmosferycznymi i miesiącem dostawy. Najniższą wilgotność (27,74%) i najwyższą wartość opałową (12,94 MJ/kg) miały zrębki dostarczane do zakładu energetycznego w miesiącu wrześniu. Od października następował stopniowy wzrost wilgotności – niższe temperatury, opady deszczu i śniegu – aż do uzyskania maksymalnej wartości średniej w miesiącu lutym 47,12%. Od marca do września (okres wiosenno-letni) zanotowano spadek wilgotności i wzrost wartości opałowej.

Na podstawie cykliczności zmian wilgotności i wartości opałowej wykazano, że najlepszym okresem dla dostawcy zrębków są miesiące od czerwca do listopada kiedy to materiał charakteryzuje się najniższą średnią wilgotnością (< 40 %) i najwyższą wartością opałową (> 10 MJ/kg).

Ważnym parametrem z punktu widzenia dostawcy wpływającym na zmniejszenie cen za przekroczenie ustalonych norm, jest zawartość popiołu. Średnia zawartość popiołu w badanych zrębkach, w większości przypadków oscylowała w granicach 3-4%. W badanym okresie wystąpiło 11,5% wszystkich dostaw z przekroczeniem wartości ustalonej z odbiorcą. Największe przekroczenia zanotowano w miesiącach letnich (czerwiec i sierpień), przy czym średnia zawartość popiołu w miesiącu czerwcu wyniosła powyżej 5%, natomiast w sierpniu była do tej wartości zbliżona. Na podstawie uzyskanych wyników można wskazać, że zawartość popiołu jest związana z porą roku (miesiącem) i wilgotnością zrębków.

Jak już wykazano w publikacji **Gendek i in. (2018a)**, zawartość popiołu w zrębkach jest parametrem, na który dostawca zrębków może mieć wpływ poprzez zastosowanie odpowiedniej metody prac podczas zrębkowania. Przypuszczalnie nadmiar popiołu pochodzi głównie z zanieczyszczeń mineralnych w postaci piachu znajdujących się w m.in. ściółce leśnej i w korze, pobieranych podczas nieumiejętnego chwytania pozostałości z powierzchni leśnej i zbytniego zagłębiania chwytaka w glebę.

Stwierdzono jednak, że średnia wartość opałowa w każdym miesiącu zawierała się w dopuszczalnym przedziale, spełniła wymogi stawiane przez zakład energetyczny i była wyższa niż określona wartość minimalna.

Uwzględniając umowne (wskazane we wstępie) i zmierzone parametry zrębków dostarczanych do zakładu energetycznego po uwzględnieniu potrąceń za przekroczenie norm, wyznaczona zostaje średnia cena rozliczeniowa za GJ energii. W zależności od miesiąca dostaw cena rozliczeniowa była od kilku do kilkudziesięciu groszy za GJ niższa w odniesieniu do ceny podstawowej. Największa różnica występowała w miesiącach letnich (czerwiec i sierpień), w których to najczęściej dochodziło do przekroczenia norm zawartości popiołu. Są to jednak miesiące, kiedy to występuje zmniejszone zapotrzebowanie na energię i dzienne dostawy są mniejsze w odniesieniu do okresu jesienno-zimowego.

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że w całym analizowanym roku cena rozliczeniowa była niższa od ceny podstawowej ustalonej z odbiorcą. Sytuacja ta wynika z metody ustalania ceny rozliczeniowej. Cena rozliczeniowa dotyczy dostaw dziennych i może być korygowana jedynie w dół w przypadku nie dotrzymania przez dostawcę wymaganych wartości parametrów zrębków. Taki system oznacza, że każde negatywne odstępstwo od założonych wartości parametrów jakościowych obniża cenę rozliczeniową a jednocześnie nie istnieje żaden mechanizm, który tę cenę mógłby podnieść. W takiej sytuacji

wnioskowanie o cenie rozliczeniowej na podstawie średnich miesięcznych wartości parametrów jakościowych nie jest poprawne. Nadmienić należy, że najczęściej przekraczanym parametrem jakościowym jest zawartość popiołu w zrębkach, która jak wykazano w publikacji **Gendek i in. (2018a)** jest zależna od stosowanej technologii zrębkowania pozostałości.

Oceniając system rozliczeń między dostawcami a odbiorcami leśnych zrębków energetycznych stwierdzono, że w wielu przypadkach działa on na niekorzyść dostawców, doprowadzając do obniżenia ceny podstawowej. Analizowane zasady rozliczeń między dostawcą a odbiorcą leśnych zrębków energetycznych nie uwzględniają odległości między miejscem pozyskania surowca a jego odbiorcą. O ile jest to możliwe odległość transportu biomasy powinna być wzięta pod uwagę podczas ustalania ceny podstawowej.

Jak wykazano w przedstawionej do oceny dorobku naukowego publikacji **Gendek i Nurek (2016)**, transport zrębków w Polsce odbywa się na odległość od 188 do 499 km (średnio 341 km). Tak duże odległości transportu stawiają pod znakiem zapytania opłacalność wykorzystania zrębków na cele energetyczne. Istotne było przeprowadzenie analizy czynników wpływających na wartość zrębków dostarczonych do zakładu energetycznego oraz wskazanie możliwości poprawy efektywności ekonomicznej ich transportu i sprzedaży. Zakłady energetyczne rozliczają dostarczony im ładunek zależnie od ilości zgromadzonej w nim energii. Mniejsze znaczenie ma masa lub objętość zrębków – jest ona brana pod uwagę jedynie w rozliczeniu wstępnym nie uwzględniającym rzeczywistej wilgotności i zależnej od niej wartości opałowej.

Dostawca zrębków dla uzyskania jak najlepszego wyniku finansowego jest zainteresowany dostarczeniem do zakładu jak największej ilości energii. Ilość ta zależy od dwóch parametrów: ilości (masy) zrębków zgromadzonych na środku transportowym oraz wartości opałowej zależnej od ich wilgotności. Analizując te dwa parametry zauważono, że występuje ich sprzeczność – przeciwne oddziaływanie na efekt końcowy. Z jednej strony wzrost wilgotności można uznać za korzystny, gdyż dla stałej objętości środka transportowego im większa wilgotność tym większa masa i większa wartość rozliczenia początkowego ładunku. Z drugiej strony, wzrost wilgotności powoduje zmniejszenie wartości opałowej surowca i zmianę końcowej wartości rozliczeniowej.

W podjętych analizach (**Gendek i in., 2018b**) rozważano możliwość zmniejszenia wilgotności zrębków na pojeździe w czasie transportu – ciągnikiem siodłowym z naczepą o objętości 91m<sup>3</sup>. Zakładając, że średnia odległość transportu biomasy wynosi 300 km (**Gendek i Nurek, 2016**), a prędkość przejazdu 60–70 km/h, przyjęto, że transport trwa około 5 godzin, które można wykorzystać do zmniejszenia wilgotności zrębków. Te warunki transportu sprzyjają procesowi suszenia, który jak wykazano w publikacji **Gendek i Głowacki (2009)** charakteryzuje się w pierwszych godzinach największą dynamiką.

Cel przeprowadzonych analiz (**Gendek i in., 2018b**) zakładał wykazanie zmian wartości ładunku zrębków (związanej ze zmniejszeniem wilgotności) podczas ich transportu i wymagał odniesienia się do masy początkowej biomasy załadowanej do naczepy na powierzchni leśnej. Takie podejście umożliwiło wykonanie obliczeń, w których masa suchej substancji jest taka sama w dwóch rozpatrywanych stanach: u producenta –powierzchnia leśna (wilgotność początkowa) i u odbiorcy – zakład energetyczny (wilgotność końcowa).

Masa początkowa ładunku wynikała z objętości naczepy i gęstości nasypowej zrębków wyznaczonej w publikacji **Gendek i in. (2016)**.

Analizując zmianę wilgotności w poszczególnych miesiącach stwierdzono, że lepsze efekty można uzyskać susząc w czasie transportu zrębki o wyższej wilgotności, gdyż zgodnie z dynamiką procesu suszenia, przebiega on szybciej w początkowej fazie usuwając wodę wolną (**Gendek i Głowacki, 2009**). W warunkach naturalnych, ze względów technicznych taki wynik może być trudny do osiągnięcia, dlatego przyjęto, że w czasie transportu może nastąpić spadek wilgotności zrębków o ok. 4 do 7%. Założenie to stało się powodem ograniczenia zakresu analiz wpływu wilgotności zrębków na wartość ładunku (od wartości wilgotności początkowej 45%, do wartości wilgotności końcowej 20%).

Uwzględniając dane rzeczywiste dotyczące dostaw zrębków do zakładów energetycznych, wyznaczono zysk dostawcy dla pojedynczego ładunku w zależności od wilgotności początkowej ładunku na powierzchni leśnej i wilgotności końcowej jaką można uzyskać w zakładzie energetycznym. Przy spadku wilgotności zrębków w czasie transportu o 1%, wykazano, że zysk dostawcy na pojedynczym ładunku będzie się zawierał w granicach 15-20 PLN. Zakładając uzyskanie spadku wilgotności o 7%, zysk będzie się zawierał w granicach 100-126 PLN dla jednego ładunku.

Kwoty te w odniesieniu do jednego ładunku nie są zbyt wysokie, jednak należy kwestię tą rozpatrywać długofalowo. Odnosząc się do rzeczywistej firmy leśnej zajmującej się rozdrabnianiem pozostałości zrębowych i transportem zrębków, średnio w ciągu jednego dnia przedsiębiorca (o którym wspomniano we wstępie) dostarcza do zakładu energetycznego ok. 350 Mg zrębków co daje ok. 15 transportów. Wykazany dzienny zysk dostawcy w wyniku zmniejszenia wilgotności zrębków w czasie transportu może wynieść od min. 225 PLN do ok. 1890 PLN lub więcej, co w skali roku przełoży się na dziesiątki tysięcy złotych.

Istotnym osiągnięciem jest stwierdzenie, że z przeprowadzonych analiz matematycznych jednoznacznie wynika, że zmniejszenie wilgotności zrębków pomimo utraty masy korzystnie wpływa na wartość końcową ładunku zgromadzonego na pojeździe.

Wyniki analizy ekonomicznej zmniejszania wilgotności zrębków w trakcie ich transportu przyczyniły się do podjęcia dalszych badań dotyczących technicznych możliwości zmniejszenia wilgotności biomasy na naczepie ciągnika siodłowego bez dostarczania energii spoza tego systemu. Stworzone zostało autorskie, eksperymentalne stanowisko pomiarowe, na którym wykonywane są obecnie symulacje zmniejszania wilgotności zrębków przy zmiennej temperaturze i prędkości przepływu czynnika suszącego.

### **Podsumowanie i wnioski końcowe z osiągnięcia naukowego**

Przedstawione do oceny publikacje przedstawiają kompleksowe ujęcie jakości i dostaw biomasy leśnej w postaci zrębków od momentu oszacowania ilości pozostałości zrębowych na powierzchni leśnej, poprzez technologię ich pozyskania po transport do zakładów energetycznych. Zawierają również analizy parametrów jakościowych zrębków takich jak wilgotność, zawartość popiołu i wartość opałowa oraz możliwość ich poprawy przed dostarczeniem do odbiorcy jakim jest zakład energetyczny w celu zwiększenia zysków dostawcy (producenta zrębków). Na podstawie przeprowadzonych badań, można wskazać kilka wniosków przyczyniających się do zwiększenia wiedzy na temat leśnych zrębków energetycznych oraz praktycznych wniosków dla przedsiębiorców leśnych.

Jak wykazano, na etapie szacowania masy pozostałości wystawianych do sprzedaży, leśniczowie w ujęciu ogólnym niedoszacowują ich ilości, co jest korzystne dla firmy zrębkującej – średnia błąd szacowania wynosi -6%. Przedsiębiorcy na podstawie wystawionej do sprzedaży masy mogą w miarę poprawnie dobrać i zaplanować liczbę maszyn i pojazdów do wykonania zadań. Występuje jednak duży rozrzut wyników dla pojedynczych powierzchni, gdzie błędy szacowania zawierają się w zakresie od -40% do +54%.

Rozdrabniając pozostałości zrębowe wskazane jest zrębkowanie rębarką z nożami ostrymi ponieważ wytworzone zrębki uzyskują większą gęstość nasypową. Pozwala to znacznie efektywniej wykorzystać przestrzeń ładunkową pojazdu. Przy stałej objętości możliwe jest transportowanie większej masy zrębków, co przekłada się na mniejsze koszty jednostkowe tym bardziej, że transport odbywa się zazwyczaj na odległości rzędu 300 km.

Podstawowymi parametrami jakościowymi zrębków leśnych, które ustalają i uwzględniają w rozliczeniach zakłady energetyczne są wartość opałowa, wilgotność i zawartość popiołu. Parametry te są wzajemnie powiązane jak również zależą od technologii pozyskiwania zrębków. Z badań wynika, że najwyższą wartość opałową mają zrębki, pozyskiwane i dostarczane w okresie letnim, kiedy ich wilgotność jest najmniejszą.

Aby uzyskać najwyższą wartość opałową zrębków i najmniejszą zawartość popiołu zaleca się zrębkowanie w dwóch technologiach. W pierwszej rozdrabnianie pozostałości powinno być wykonywane bezpośrednio na powierzchni leśnej po kilku miesiącach od wykonania zrębu. W drugiej pozostałości po kilku miesiącach od zrębu powinny zostać zebrane z powierzchni i ułożone w stosach, a następnie zrębkowane ze stosu. Najmniej korzystną technologią z punktu widzenia uzyskiwanej wartości opałowej i zanieczyszczeń jest technologia pakietowania. We wszystkich technologiach należy zwracać uwagę na pracę operatora, gdyż podstawową przyczyną zanieczyszczenia zrębków cząstkami mineralnymi jest zagłębianie chwytaka w glebę podczas podejmowania gałęzi.

Jakość zrębków jest podstawowym parametrem w rozliczeniach pomiędzy zakładem energetycznym a dostawcą. Przeprowadzone analizy wykazały jednak, że system rozliczeń nie jest korzystny dla dostawcy. Jest on karany za przekroczenia ustalonych wartości. Cena rozliczeniowa może być korygowana jedynie w dół w przypadku nie dotrzymania przez dostawcę wymaganych wartości parametrów zrębków (ustalone minimum lub maksimum wartości opałowej, wilgotności i zawartości popiołu). Nie istnieje żaden mechanizm, który mógłby mobilizować dostawcę do poprawy parametrów energetycznych zrębków.

Ze względu na to, że transport zrębków do elektrociepłowni odbywa się na duże odległości, wskazane jest zmniejszanie wilgotności zrębków na pojeździe w czasie transportu, szczególnie w pierwszym okresie, kiedy dynamika spadku wilgotności jest największa. Zmniejszenie wilgotności poprawi jakość zrębków – zwiększy się wartość opałowa – co wpłynie korzystnie na rozliczenie końcowe dostawcy z zakładem energetycznym. Przy spadku wilgotności o 7% od wartości początkowej zyski dostawcy na jednym ładunku mogą wynieść do ok. 126 zł, co w ujęciu rocznym może przekładać się na dziesiątki tysięcy złotych.

## **Bibliografia**

*Publikacje wskazane w punkcie 4b) Autoreferatu, przedłożone do oceny dorobku naukowego*  
Gendek, A., Aniszewska, M., Chwedoruk, K., 2016. Bulk density of forest energy chips. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Agriculture* 67: 101–111.



- Gendek, A., Głowacki, S., 2009. Convectional drying of chips for energy purposes. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Agriculture* 53: 67–72.
- Gendek A., Zychowicz W. 2014. Investigations on the calorific value of forest chips. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Agriculture* 63: 65–72
- Gendek, A., Malańák, J., Velebil, J., 2018a. Effect of harvest method and composition of wood chips on their caloric value and ash content. *Sylvan* 162: 248–257.
- Gendek, A., Nurek, T., 2016. Variability of energy woodchips and their economic effects. *Folia Forestalia Polonica, Series A* 58: 62–71. <https://doi.org/10.1515/ffp-2016-0007>.
- Gendek, A., Nurek, T., Zychowicz, W., Moskalik, T., 2018b. Effects of Intentional Reduction in Moisture Content of Forest Wood Chips during Transport on Truckload Price. *BioResources* 13: 4310–4322. <https://doi.org/10.15376/biores.13.2.4310-4322>.
- Gendek, A., Wężyk, P., Moskalik, T., 2018c. Udział oraz dokładność szacowania pozostałości zrębowych w ogólnej masie pozyskanego drewna. *Sylvan* 162: 679–687.

## **5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych**

### ***a) Przed doktoratem***

Pracą naukową zainteresowałem się na IV roku studiów na Wydziale Techniki Rolniczej i Leśnej SGGW w Warszawie. Tematyka dotyczyła pozyskiwania drewna przy użyciu pilarek spalinowych. Bezpośrednio po zakończeniu studiów zostałem zatrudniony w Zakładzie Mechanizacji Leśnictwa, gdzie pod kierunkiem prof. dr hab. Jerzego Więsiaka rozpocząłem badania związane z użytkowaniem pilarek oraz skrawaniem drewna piłą łańcuchową.

Moja aktywność naukowa w latach 1997-2005 koncentrowała się na następujących problemach:

- zmiany cech charakterystycznych pilarek spalinowych oraz czynniki wpływające na wybór przez użytkowników określonych modeli pilarek;
- metodach pomiaru prędkości obrotowej i poślizgu sprzęgła w różnych fazach pracy silnika pilarki spalinowej;
- zasadach doboru parametrów sprzęgła odpowiednio do mocy silnika pilarki i wpływ jego stanu na proces skrawania drewna.

Wyniki badań publikowane były w czasopismach *Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej*, *Technika Rolnicza Ogrodnicza i Leśna*, *Annals of Warsaw Agricultural University – Agriculture*. W tym czasie zorganizowałem laboratorium skrawania drewna oraz po uzyskaniu grantu promotorskiego laboratorium do badań silników małej mocy stosowanych w pilarkach spalinowych (hamownia małych silników). Oryginalny, autorski sposób rejestracji przebiegu zmian prędkości obrotowej układu napędowego silnika (wał korbowego, bębna sprzęgła) oraz chwilowych oporów skrawania drewna, pozwolił na poznanie przebiegu procesu skrawania piłą łańcuchową żłobikową i zbadanie wpływu różnych czynników na jego efektywność. Badania prowadziłem głównie samodzielnie.

Efektom końcowym badań była rozprawa doktorska dotycząca wpływu parametrów sprzęgła pilarki spalinowej na wydajność skrawania drewna.

### ***b) Po doktoracie***

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk rolniczych w roku 2005, przez kolejne 4 lata nadal zajmowałem się zagadnieniami związanymi ze skrawaniem drewna przy użyciu pilarek spalinowych. Od ok. roku 2009 swoje zainteresowania naukowe skierowałem w stronę

użytkowania maszyn w procesie pozyskiwania drewna i biomasy leśnej na cele energetyczne oraz parametrów jakościowych i możliwości przetwarzania biomasy leśnej – głównie pozostałości zrębowych i zrębków – do produkcji energii, którym to problemem zajmuję się obecnie.

Moja aktywność naukowa dotyczyła dwóch obszarów:

- użytkowania maszyn leśnych (w tym pilarek spalinowych) i określania ich wydajności oraz efektywności pracy;
- wykorzystania biomasy leśnej na cele energetyczne (pozostałości zrębowych, zrębków i innych produktów ubocznych z produkcji leśnej), w tym możliwości polepszania jej parametrów jakościowych i przerobu do postaci paliw uszlachetnionych.

Wyniki badań publikowane były w czasopismach z listy A oraz B wykazu czasopism MNiSW takich jak: Rocznik Ochrona Środowiska, Sylwan, Forests, Bioresources, Biomass & Bioenergy, Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna, Annals of Warsaw Agricultural University – Agriculture, Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, Forest Research Papers, Agronomy Research.

Początkowo badania prowadziłem samodzielnie. Obecnie pracuję głównie w zespołach badawczych rozwijając również współpracę międzynarodową, w których w wielu tematach i publikacjach jestem autorem wiodącym.

### **Wpływ warunków pracy na zmienność oporów skrawania drewna i wydajność pracy pilarki spalinowej**

Czynnikami, które mają istotny wpływ na wydajność skrawania pilarki z piłą łańcuchową są: wielkość silnika, zadawana przez operatora siła posuwu, parametry piły łańcuchowej (geometria ostrza, stępienie, napięcie), właściwości drewna, wysokość rzazu.

Pilarka osiąga tym większą wydajność skrawania im większy moment obrotowy rozwinie silnik. Z kolei od operatora zależy czy poprzez zadawanie odpowiedniej siły posuwu potrafi on wykorzystać posiadany przez silnik potencjał mocy. W trakcie użytkowania pilarki, operator napotyka bardzo zróżnicowane warunki pracy. Powodują je zmienność właściwości drewna, zmienna wysokość rzazu, a także zmiana stanu technicznego piły (napięcie piły, stępienie ogniw tnących). Wraz ze zmianą stanu technicznego silnika, zmianie ulega również jego charakterystyka zewnętrzna. Niezależnie w jakich warunkach wykonywane jest skrawanie to operator przez ustalenie określonej siły posuwu, a niekiedy przez ustalenie wysokości rzazu decyduje o obciążeniu silnika. Aby uzyskać maksymalne efekty skrawania, powinien znać właściwości pilarki i przewidywać skutki podejmowanych decyzji.

Na podstawie prowadzonych badań ustalono, że największą wydajność skrawania piła uzyskuje przy prędkości obrotowej nieco większej (o ok. 800 obr/min) od prędkości maksymalnego momentu obrotowego. Przy większym obciążeniu układu napędowego przechodzi on w stan niestabilnej pracy, co skutkuje poślizgiem sprzęgła i spadkiem wydajności skrawania. Spadek wydajności skrawania następuje również ze wzrostem prędkości skrawania i zmniejszeniem się grubości wiórów. W związku z tym występuje pewien przedział prędkości (ok. 9000 obr/min  $\pm$ 500), przy której piła łańcuchowa może skrawać drewno z maksymalną wydajnością. Utrzymanie przez operatora stosunkowo wąskiego zakresu optymalnej wydajności wymaga bardzo dużej wprawy w posługiwaniu się

pilarką. Ułatwieniem dla operatora byłby wskaźnik w pilarce spalinowej sygnalizujący operatorowi optymalne warunki skrawania drewna.

W zakresie roboczych prędkości obrotowych (powyżej 8200 obr/min), gdy skrawanie odbywa się z prędkością obrotową większą niż prędkość maksymalnego momentu obrotowego silnika, średnia wartość poślizgu sprzęgła nie przekracza 0,5%. Przy prędkościach obrotowych pomiędzy punktem maksymalnego momentu, a punktem rozłączenia się sprzęgła poślizgi uzyskują wartość nawet rzędu kilku procent. Jest to niestabilny zakres prędkości obrotowych silnika pilarki, w którym chwilowe zwiększenie obciążenia sprzęgła powoduje spadek prędkości poniżej punktu przecięcia się linii maksymalnego momentu sprzęgła z momentem silnika oraz następuje zatrzymanie się piły łańcuchowej w rzazie (poślizg 100%).

Stwierdzono, że w czasie eksploatacji pilarki i zużywania się sprzęgła, współczynnik tarcia utrzymuje się na stałym poziomie. W stosowanych obecnie sprzęgłach wartość współczynnika tarcia wynosi 0,165 przy błędzie oszacowania 3,92%.

Bardzo ważnym wynikiem prowadzonych przeze mnie badań było ustalenie zmian oporów skrawania piły żłobikowej, dotychczas nie opisanych w literaturze. Okazało się, że cykliczny przebieg zmian prędkości obrotowej charakterystyczny dla jednocylindrowego, dwusuwowego silnika spalinowego, powoduje odpowiednią cykliczną zmianę prędkości i napięcia piły oraz cykliczną zmianę siły skrawania drewna. Amplituda zmian chwilowych wartości prędkości obrotowych w stosunku do wartości średniej rośnie wraz ze wzrostem prędkości obrotowej skrawania drewna i zawiera się w granicach 550-850 obr/min. Taka zmiana prędkości w bardzo krótkim czasie powoduje duże zmiany przyspieszenia piły.

Zmienność oporów skrawania ma bezpośredni związek z charakterem pracy silnika. W chwili gdy następuje przyspieszenie lub opóźnienie ruchu tłoka następują chwilowe zmiany napięcia piły łańcuchowej wywołane bezwładnością jej masy. Wtedy i ogniwa tnące zmieniają cyklicznie swój kąt ustawienia i mniej lub bardziej zagłębiają się w drewno lub wręcz wygłębiają się z niego. Powoduje to występowanie chwilowych maksymalnych i minimalnych (najczęściej zerowych) wartości siły skrawania drewna. Amplituda zmian chwilowych wartości siły skrawania w stosunku do wartości średniej wynosi ok. 400 N.

Na podstawie dokonanych zapisów zmian można stwierdzić, że czasy cykli wartości szczytowych chwilowej siły skrawania odpowiadają czasom jednego obrotu wału korbowego silnika. Stan zużycia sprzęgła pilarki wpływa na przebieg momentu obrotowego silnika i jego wartość maksymalną. Przy mniejszym zagłębieniu się ostrzy tnących piły łańcuchowej zmniejsza się jej wydajność skrawania. Zatem na wydajność ma wpływ zarówno charakter pracy silnika pilarki jak również zmienność oporów skrawania.

Uzyskane wyniki zostały opublikowane m.in. w:

- Gendek, A., 2009. Parametry wpływające na zmienność oporów skrawania drewna piłą łańcuchową. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych 543: 101–110.
- Gendek, A., 2007. Wpływ parametrów układu napędowego pilarki spalinowej na wydajność skrawania drewna. Prace Komisji Nauk Rolniczych Leśnych i Weterynaryjnych, Polska Akademia Umiejętności 9: 27-36.
- Gendek, A., 2006. Wpływ parametrów silnika pilarki spalinowej na wydajność skrawania drewna. Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna 6: 23–25.

- Gendek, A., Kociołek, M., 2006. Stanowisko do pomiaru prędkości obrotowych i poślizgów w sprzęgle pilarki spalinowej. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna* 8: 23–25.
- Gendek, A., Maciak, A., 2007. Determination of friction coefficient in the chain saw clutch. *Annals of Warsaw Agriculture University, Agriculture* 50: 53–58.
- Gendek, A., Maciak, A., 2007. Effect of cutting with the chain saws with two pairs of cutting links per section. *Annals of Warsaw Agriculture University, Agriculture* 50: 59–63.

### **Wydajność i efektywność pracy maszyn leśnych**

W obecnych czasach uprzążając powierzchnie leśne z pozostałości zrębowych powszechnie stosuje się rębarki mobilne do ich przetworzenia do postaci zrębków. Prowadzone badania obejmowały określenie efektywności stosowania do produkcji zrębków samojezdnej rębarki z zasobnikiem BRUKS 805 CT. Badania prowadzono na powierzchni zrębu zupełnego po usunięciu drzewostanu sosnowego oraz w drzewostanie świerkowym po usunięciu drzew z II piętra. Uzyskano wydajność efektywną 31,0 m<sup>3</sup>/h na powierzchni zrębu zupełnego sosnowego i 40,0 m<sup>3</sup>/h w drzewostanie świerkowym. Stwierdzono, że wydajność zależy od ilości oraz wielkości stosów gałęzi i odległości między nimi. Ważny był również czas chwytania pojedynczej partii gałęzi. Wydajność operacyjna w przeliczeniu na surowiec drzewny wyniosła 8,6 i 13,2 m<sup>3</sup>/h.

Jedną z technologii uprzążania powierzchni leśnych jest pakietowanie pozostałości zrębowych. Po wykonaniu pakietów należy je zebrać z powierzchni leśnej, przetransportować do miejsca składowania i przygotować do transportu. Analizie poddano operację zrywki pakietów agregatem złożonym z ciągnika rolniczego Zetor Forterra 115 z przyczepą samozaładowczą FaoFar 1142. Stwierdzono, że wydajność operacyjna zależy od długości i struktury cyklu roboczego maszyny. Wyniki pokazały, że wydajność tego urządzenia jest około 40-50% niższa niż wydajność średniej klasy specjalistycznego ciągnika leśnego. Zestaw składający się z ciągnika rolniczego i przyczepy samozaładowczej (wyposażonej w żuraw) jest dobrym, alternatywnym do forwardera, rozwiązaniem do zrywki pakietów drewna małowymiarowego. Podobnie jak w przypadku zrywki drewna okrągłego zestaw zrywkowy tego typu może rywalizować z forwarderami, gdy zadania pozyskiwania drewna są niezbyt duże i rozproszone oraz realizowane w sprzyjających warunkach terenowych. Dodatkowym atutem zestawu zrywkowego opartego o ciągnik rolniczy jest to, że współczesne ciągniki rolnicze są konstrukcyjnie dostosowane do wykonywania prac transportowych i mogą pokonywać po drogach utwardzonych duże odległości z stosunkowo dużą prędkością. Ta cecha znakomicie ułatwia rozwiązanie problemu dotarcia maszyny do powierzchni roboczej i powrotu do bazy.

Ważnym zadaniem jakie corocznie mają do wykonania Zakłady Usług Leśnych jest pielęgnacja upraw. Przy niewielkim stopniu mechanizacji często zależnym od warunków siedliskowych i dostępności powierzchni uprawy, jest to praca stosunkowo mało wydajna i wymagająca dużych nakładów pracy ręcznej. Dla zwiększenia wydajności Zakłady Usług Leśnych często w warunkach domowych modyfikują na własne potrzeby dostępny sprzęt. Opisano bilans czasu pracy i wydajność zmodyfikowanej kosiarki do wykaszania upraw leśnych. W warunkach uprawy leśnej, na której wykonywano spóźniony zabieg wykaszania chwastów agregat osiągnął średnią wydajność eksploatacyjną  $W_{07} = 0,13$  ha/h oraz wydajność operacyjną  $W_{02} = 0,17$  ha/h. Wydajność efektywna wyniosła  $W_1 = 0,26$  ha/h.

Tam, gdzie analityczne wyznaczenie rozwiązania byłoby bardzo pracochłonne, a niekiedy nawet niemożliwe stosuje się techniki symulacyjne. Ich ważną zaletą jest redukcja czasu i kosztów doświadczeń, co ma znaczenie w przypadku leśnych procesów technologicznych wymagających długotrwałych obserwacji na wielu rozrzuconych powierzchniach. W przypadku transportu surowców drzewnych obserwacje wymagają również przemieszczania się na duże odległości. Przeprowadzone badania eksploatacyjne maszyn leśnych umożliwiły dokonania określonych uogólnień osiąganych wydajności efektywnych, prędkości i czasu zmiany miejsca pracy, wykonania niezbędnych czynności przygotowawczo-zakończeniowych, co umożliwiło stworzenie modeli matematycznych. Wykorzystując nowoczesne narzędzia informatyczne do doskonalenia organizacji prac leśnych, analizowano procesy uprzątania powierzchni leśnych w technologii zrębkowania i pakietowania pozostałości. Do osiągnięcia celu stworzono modele procesów, schematy sieci powiązań, a następnie przeprowadzono symulacje. Symulacja pozwoliła na wskazanie „wąskich gardeł” w analizowanych technologiach, dobór liczby maszyn i pracowników oraz ustalić właściwą organizację pracy do wykonania zadań w ujęciu długookresowym.

Uzyskane wyniki zostały opublikowane m.in. w:

- Gendek, A., Nurek, T., 2010. Symulacja procesów technologicznych w leśnictwie przy wykorzystaniu oprogramowania Witness, w: *Użytkowanie Maszyn Rolniczych i Leśnych*, Polska Akademia Umiejętności. Prace Komisji Nauk Rolniczych Leśnych i Weterynaryjnych PAU Nr 14, Tom II. pp. 63–72.
- Gendek, A., Zychowicz, W., Powierża, M., 2012. Balance of operational time and productivity of the outfit for forest culture tending. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Agriculture* 60: 103–109.
- Gendek, A., Dziubałka, M., 2010. Zastosowanie symulacji komputerowych w procesach leśnych przy wykorzystaniu oprogramowania Witness, w: *Problemy Inżynierii Rolniczej i Leśnej*. Warszawa, pp. 88–94.
- Zychowicz, W., Gendek, A., 2013a. Logging of tree residues bundles with use of agricultural tractor and log trailer – case study. *Леса России И Хозяйство В Них* 1: 70–73.
- Zychowicz, W., Gendek, A., 2013b. Ocena efektywności pozyskiwania pakietów z powierzchni pozrębowej przy zastosowaniu ciągnika rolniczego z przyczepą samozaładowczą, w: *Gołos, P., Kaliszewski, A. (Red.), Biomasa Leśna Na Cele Energetyczne*. Instytut Badawczy Leśnictwa, Sękocin Stary, pp. 119–126.
- Zychowicz, W., Gendek, A., 2009. Efektywność stosowania samobieżnej rębarki z zasobnikiem do pozyskiwania zrębków na cele energetyczne. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 543: 417–425.

### **Wykorzystanie szyszek i zrębków leśnych na cele energetyczne oraz możliwość ich przerobu do postaci paliw uszlachetnionych**

Rosnące z roku na rok zapotrzebowanie na energię, oprócz wykorzystania zrębków, wskazuje na potrzebę poszukiwania produktów alternatywnych i zainteresowanie się możliwościami przetwarzania ich do postaci paliw uszlachetnionych. W związku z tym obecnie prowadzone przeze mnie badania skupiają się na wykorzystaniu zrębków leśnych w postaci pierwotnej oraz szyszek drzew leśnych i pustych nasion jako odpadu z wyluszczeni do wytwarzania paliw uszlachetnionych w postaci brykietów. Badania skupiają się również na energetycznym wykorzystaniu tego rodzaju biomasy.

W funkcjonujących w Polsce wyluszczeniach nasion, do zasilania i ogrzewania szaf luszczarskich wykorzystuje się głównie energię elektryczną. W starszych wyluszczeniach część energii cieplnej wykorzystywanej w procesie luszczania pochodzi również ze spalania pustych szyszek, które charakteryzują się niską wilgotnością (około 8%) i nie trzeba ponosić dodatkowych nakładów na ich suszenie. Jednak ilość szyszek dostępna w sezonie i ilość energii cieplnej (18-19 MJ/kg), którą można z nich uzyskać, nie wystarcza na pokrycie zapotrzebowania na ciepło w takim stopniu, aby wyluszczenia były samowystarczalne. W prowadzonych badaniach rozpatrywano możliwość transportowania szyszek pomiędzy wyluszczeniami oraz zakładami energetycznymi, które mogłyby być zainteresowane ich wykorzystaniem. Wyznaczone zostały podstawowe parametry energetyczne i transportowe szyszek oraz nasion. Gęstość nasypowa szyszek trzech gatunków – sosna, świerk, modrzew – zawiera się w granicach 106-206 kg/m<sup>3</sup> i ma bezpośredni związek z wielkością szyszek. Wyznaczono również współczynnik zamienny jako iloraz gęstości nasypowej do gęstości właściwej. Niekorzystne właściwości transportowe pozwoliły stwierdzić, że szyszki powinny być wykorzystywane lokalnie, najlepiej bezpośrednio w wyluszczeniu, w której były luszczane. Wykorzystanie przez wyluszczenia szyszek w celach opałowych może być opłacalne tylko wtedy, gdy ponoszony będzie jedynie koszt ich transportu. Nieopłacalnym okazał się zatem zakup szyszek przez pośredników i ich transport do wyluszczenia, w których wykorzystywane są jako materiał opałowy. Możliwe jest wykorzystanie samochodów ciężarowych o mniejszej objętości komory ładunkowej, jednak rentowność uwarunkowana będzie odległością transportu oraz gęstością usypową transportowanych szyszek. Najmniej korzystne okazuje się stosowanie małych samochodów dostawczych, którymi transport szyszek sosnowych i modrzewiowych ograniczony był do odległości ok. 110 km. Z kolei transport szyszek świerkowych był całkowicie nieopłacalny, gdyż minimalna odległość między wyluszczeniami jest większa niż maksymalna odległość transportu.

Alternatywą dla całych szyszek po wyluszczeniu nasion jest ich rozdrobnienie i aglomeracja do postaci brykietu. Zagęszczając je uzyskuje się m.in. większą koncentrację energii w jednostce objętości, obniżenie wilgotności, homogenizacja paliwa umożliwiającą zautomatyzowanie procesu spalania czy niższe koszty transportu i składowania związane ze zwiększeniem gęstości biomasy. Przeprowadzone badania wykazały, że brykiet wytworzony z rozdrobnionych szyszek sosny, świerka i modrzewia charakteryzuje się dużą gęstością (938-1078 kg/m<sup>3</sup>), która dobrze koreluje z jego trwałością (87-97%) i wytrzymałością na ściskanie (2,8-9,7 MPa). Na podstawie wyników, uzyskanych na drodze eksperymentów, opisanych wielkością cząstek, gęstością brykietów oraz ich oceną jakościową w formie trwałości mechanicznej, naprężeń maksymalnych uznano, że uzyskano brykiet dobrej jakości. Pod względem trwałości mechanicznej brykiet świerkowy i sosnowy zaliczono do I klasy, natomiast brykiet modrzewiowy do II klasy.

Do produkcji brykietów powszechnie wykorzystuje się odpady z zakładów przerobu drewna w postaci wiórów, trocin i pyłu, które mają jednorodny skład i wielkość cząstek. Rozważając wytwarzanie brykietu bezpośrednio ze zrębków powstałych z rozdrobnienia pozostałości leśnych należy wziąć pod uwagę ich naturalny skład, który nie jest jednorodny. W ich składzie znajdują się czyste drewno, kora, znaczne ilości igliwia a także zanieczyszczenia mineralne. Inna jest również wielkość cząstek. Prowadzone badania miały na celu określenie cech fizycznych oraz składu chemicznego rozdrobnionych pozostałości zrębnych jako

całości, jako mieszaniny różnych postaci biomasy i części mineralnych. Prowadząc badania zastosowano nowatorską metodę określania gęstości objętościowej materiału w postaci sypkiej oraz zdefiniowano innowacyjny współczynnik przeliczeniowy. Zastosowana metoda nie wymaga stosowania specjalistycznej aparatury i nie generuje znaczących kosztów. Zdefiniowany i wyznaczony w badaniach współczynnik przeliczeniowy umożliwia przybliżone określenie gęstości właściwej zrębków. Uzyskane parametry fizyko-chemiczne świadczą o możliwościach wykorzystania sosnowych pozostałości zrębowych jako surowca energetycznego i są przyczynkiem do prowadzenia kolejnych badań, które są realizowane.

Uzyskane wyniki zostały opublikowane m.in. w:

- Aniszewska, M., Gendek, A., 2016a. Logistics of the supplies of selected forest tree species' cones. Part 1. Cone density and substitution coefficient. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Agriculture* 67: 121–130.
- Aniszewska, M., Gendek, A., 2016b. Logistics of delivery of cones of selected species of forest trees. Part 2: Cone transport. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Agriculture* 68: 113–121.
- Aniszewska, M., Gendek, A., Drożdżek, M., Bożym, M., Wojdalski, J., 2017. Physicochemical properties of seed extraction residues and their potential uses in energy production. *Rocznik Ochrona Srodowiska* 19, 302–334.
- Aniszewska, M., Gendek, A., Zychowicz, W., 2018. Analysis of Selected Physical Properties of Conifer Cones with Relevance to Energy Production Efficiency. *Forests* 9, 405. <https://doi.org/10.3390/f9070405>
- Gendek, A., Zychowicz, W., 2015. Analysis of wood chippings fractions utilized for energy purposes. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Agriculture* 65, 79–91.
- Nurek, T., Gendek, A., Roman, K., 2019. Forest Residues as a Renewable Source of Energy: Elemental Composition and Physical Properties. *BioResources* 14, 6–20. <https://doi.org/10.15376/biores.14.1.6-20>

## **6. Syntetyczne zestawienie dorobku naukowego oraz działalności dydaktycznej, popularyzatorskiej i organizacyjnej**

Efektom mojej działalności naukowej jest dorobek publikacyjny obejmujący łącznie 114 pozycji, w których jestem jedynym autorem, autorem głównym lub współautorem. Łączny dorobek punktacyjny wynosi 568 pkt MNiSW oraz IF=10,486 z czego po uzyskaniu stopnia doktora uzyskałem 514 pkt MNiSW oraz IF=10,486. Szczegółowe zestawienie publikacji naukowych wg wykazu czasopism MNiSW oraz wg wskaźnika Impact Factor zamieszczone zostało w tabeli 1.

Spośród 114 publikacji, 55 pozycji stanowią oryginalne prace twórcze (w tym 32 w języku angielskim), 45 pozycji inne publikacje naukowe i popularno-naukowe (w tym 2 w języku angielskim), 14 pozycji raporty i ekspertyzy. Wśród oryginalnych prac twórczych, 7 z nich zostało opublikowane w czasopismach indeksowanych w bazie JCR posiadających współczynnik Impact Factor. Łączna liczba cytowań w bazie Web of Sciences wynosi 7, indeks Hirsha: 2. Sumaryczna liczba cytowań wg bazy Scopus wynosi 9, indeks Hirsha 2. Sumaryczna liczba cytowań wg Google Scholar wynosi 178, indeks Hirsha 7 (stan na dzień 15.01.2019). Brałem czynny udział i wygłosiłem 29 referatów na konferencjach naukowych w kraju i za granicą. Byłem współredaktorem monografii indeksowanej w bazie JCR, wydanej w ramach konferencji naukowej o zasięgu międzynarodowym FORMEC 2016.

Byłem promotorem pomocniczym pozytywnie zakończonej pracy doktorskiej mgr. inż. Kamila Romana pt. „Dobór parametrów technicznych procesu brykietowania biomasy leśnej” obronionej 19.12.2017 r. przed Radą Wydziału Inżynierii Produkcji SGGW w Warszawie.

W roku 2017 (1.10.2017-31.12.2017) odbyłem trzymiesięczny staż naukowy w Czech University of Life Sciences Prague (CULS), Faculty of Engineering. Decyzją Rektora SGGW w Warszawie otrzymałem stypendium na kolejny trzymiesięczny staż naukowy do Czech University of Life Sciences Prague, którego realizacja wypada w terminie 1.03.2019-31.05.2019. W ramach współpracy międzynarodowej odbyłem 4 pobyty naukowo-dydaktyczne na okres 14 dni lub więcej w uczelniach zagranicznych.

Jestem członkiem Editorial Advisory Council w czasopiśmie naukowym Annals of Warsaw University of Life Sciences. Recenzowałem publikacje w krajowych czasopismach naukowych Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna, Studia i Materiały CEPL w Rogowie.

W swojej działalności naukowej byłem zastępcą kierownika projektu pt. „Określenie fizycznych właściwości surowców pochodzenia biologicznego stosowanych w energetyce odnawialnej” realizowanego w latach 2008-09. Jako wykonawca uczestniczyłem w 3 projektach badawczych: 2007-09 projekt MNiSW „Nowoczesne technologie energetycznego wykorzystania biomasy i odpadów biodegradowalnych (BiOB) – konwersja BiOB do energetycznych paliw gazowych”; 2013 projekt POKL „Podnoszenie jakości zarządzania zasobami SGGW”; od roku 2016 jestem wykonawcą w zadaniu „Opracowanie technologii produkcji polowej topoli (*Populus trichocarpa*) zawierającej rozdrobnienie surowca drzewnego” projektu BIOSTRATEG 2 finansowanego przez NCBIR pt. „Inteligentne systemy hodowli i uprawy pszenicy, kukurydzy i topoli dla zoptymalizowanej produkcji biomasy, biopaliw oraz zmodyfikowanego drewna”. Uczestniczyłem jako wykonawca w 2 krajowych projektach finansowanych z EFS, POKL 2017-2013.

Informacje ilościowe o pozostałej działalności naukowej bez publikacji znajdujących się w wykazie czasopism punktowanych MNiSW zestawione zostało w tabeli 2.

W ramach działalności dydaktycznej i popularyzatorskiej byłem promotorem 57 pozytywnie zakończonych prac dyplomowych, recenzowałem 47 prac dyplomowych. Zrealizowałem ponad 6000 godzin dydaktycznych prowadząc wykłady i ćwiczenia na Wydziale Leśnym, Wydziale Techniki Rolniczej i Leśnej, Wydziale Inżynierii Produkcji SGGW w Warszawie. Opracowałem programy (sylabusy) wielu przedmiotów m.in. Systemy informatyczne w leśnictwie, Procesy produkcyjne w leśnictwie, Technologie produkcji biomasy. Opracowałem materiały i założyłem 4 kursy w ramach e-learningu m.in. Systemy informacji przestrzennej, Zarządzanie produkcją w leśnictwie, Systemy informatyczne w leśnictwie. Współpracuję z Nadleśnictwem Chojnów, w którym organizuję zajęcia terenowe dla studentów Wydziału Inżynierii Produkcji SGGW w ramach przedmiotu Systemy informatyczne w leśnictwie. Biorę coroczny udział w spotkaniach z maturzystami w ramach „Dni otwartych SGGW”, „Wirtualnych dniach otwartych w SGGW”. Wielokrotnie odbywałem spotkania z uczniami szkół średnich – głównie Technikum Leśnego w Zagnańsku – popularyzując wiedzę i zachęcając uczniów do studiowania w SGGW. Byłem pomysłodawcą i organizatorem dwóch Konferencji dla nauczycieli średnich szkół leśnych (techników leśnych), którą wspierał Departament Leśnictwa w Ministerstwie Środowiska

W ramach działalności organizacyjnej przez wiele lat byłem członkiem Rady Wydziału Inżynierii Produkcji, Członkiem Rektorskiej Komisji Mieszkaniowej. Jestem członkiem



Senatu SGGW, Dziekańskiej Komisji ds. Promocji Wydziału, Sekretarzem Uczelnianej Komisji Rekrutacyjnej, Pełnomocnikiem Dziekana ds. Informatyzacji Wydziału. Byłem członkiem komitetów organizacyjnych krajowych i międzynarodowych konferencji naukowych.

Za swoją pracę zostałem nagrodzony i wyróżniony wieloma nagrodami JM Rektora SGGW, medalem Prezydenta RP „Za długoletnią służbę”, medalem „Za Zasługi Dla Wydziału Inżynierii Produkcji”.

**Tabela 1.** Zestawienie zbiorcze dorobku naukowego. Publikacje wg oceny punktowej wykazu czasopism naukowych MNiSW oraz wg wskaźnika Impact Factor (IF).

<b>Czasopismo</b>	<b>Liczba szt.</b>	<b>Suma pkt MNiSW</b>	<b>Suma IF</b>
<b>Osiągnięcie naukowe</b>			
Ann. Warsaw Univ. Life Sci. - SGGW	3	21	
BioResources	1	35	1,202
Folia Forestalia Polonica, Series A	1	14	SJR: 0,194
Sylvan	2	30	1,246
<b>Razem (1)</b>	<b>7</b>	<b>100</b>	<b>2,448</b>
<b>Publikacje, które nie wchodzą do osiągnięcia naukowego</b>			
Biomass & Bioenergy	1	35	3,358
BioResources	1	35	1,202
Forests	1	30	1,956
Sylvan	1	15	0,623
Rocznik Ochrona Środowiska	1	15	0,899
Forest Research Papers / Leśne Prace Badawcze	3	33	-
Ann. Warsaw Agric. Univ. – SGGW, (Agricult.)	4	17	-
Ann. Warsaw Univ. Life Sci. – SGGW, (Agricult.)	11	81	-
Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna	9	52	-
Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej	9	36	-
Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych	3	18	-
Inżynieria Rolnicza	1	6	-
Zeszyty Naukowe SGGW, Ekonomika i Organizacja Logistyki	1	0	-
Agronomy Research	1	0	SJR: 0,377
Леса России и хозяйство в них	1	0	-
<b>Razem (2)</b>	<b>48</b>	<b>373</b>	<b>8,038</b>
W tym przed uzyskaniem stopnia doktora	12	49	-
Monografie i rozdziały w monografiach	10	50	-
Materiały konferencyjne i streszczenia w materiałach będących w bazie JCR	3	45	-
<b>Razem (3)</b>	<b>13</b>	<b>90</b>	<b>-</b>
W tym przed uzyskaniem stopnia doktora	1	5	-
<b>SUMA (1+2+3)</b>	<b>68</b>	<b>568</b>	<b>10,486</b>
Inne publikacje naukowe nieuwzględnione w wykazie MNiSW w tym publikacje i streszczenia w materiałach konferencyjnych niebędących w bazie JCR	24	-	-
Publikacje popularno-naukowe	8	-	-
Ekspertyzy, raporty z badań	14	-	-
<b>Razem</b>	<b>46</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

**Tabela 2.** Zestawienie zbiorcze pozostałego dorobku naukowego bez publikacji znajdujących się w wykazie czasopism punktowanych MNiSW.

<b>Pozostały dorobek naukowy</b>	<b>Liczba szt.</b>
Kierownictwo i udział w projektach badawczych	3
Wygłoszone referaty	27
Uczestnictwo w programach europejskich i innych krajowych	2
Udział w komitetach organizacyjnych konferencji	5
Członkostwo w radach naukowych czasopism	1
Redagowanie monografii i materiałów konferencyjnych	3
Promotor pomocniczy w zakończonych rozprawach doktorskich	1
Zagraniczne staże naukowe, min. 3 miesiące	
- odbyte	1
- w trakcie realizacji	1
Pobyty w zagranicznych jednostkach naukowych, min. 14 dni	4
Recenzje publikacji w czasopismach naukowych	4

Arkadiusz Gondek  
Warszawa 18.01.2019