

# **AUTOREFERAT**

## **Opis dorobku i osiągnięć naukowych**

**dr inż. Arkadiusz DYJAKON**

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu  
Wydział Przyrodniczo-Technologiczny  
Instytut Inżynierii Rolniczej  
Wrocław, 2019

**1. Imię i nazwisko:** Dr inż. Arkadiusz DYJAKON

**2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.**

Magister inżynier

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, kierunek: Mechanika i Budowa Maszyn, specjalność: Termoenergetyka.

Rok uzyskania: 1999

Tytuł: Metody ograniczenia emisji zanieczyszczeń z kotłów rusztowych

Promotor: Dr inż. Stanisław Kruczek

Doktor Nauk Technicznych

Politechnika Wrocławska, Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów

Rok uzyskania: 2003

Tytuł: Stabilizacja płomienia pyłowego plazmą

Promotor: Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Kordylewski

Praca doktorska obroniona z wyróżnieniem

**3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych.**

**2012-do chwili obecnej** Adiunkt na Wydziale Przyrodniczo-Technologicznym Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu w Zakładzie Niskoemisyjnych Źródeł Energii i Gospodarki Odpadami Instytutu Inżynierii Rolniczej.

**2010-2012** Adiunkt na Wydziale Przyrodniczo-Technologicznym Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu w Zakładzie Podstaw Techniki Instytutu Inżynierii Rolniczej

**2008-2010** Pracownik naukowy na Uniwersytecie Technicznym Delft w Holandii, na wydziale Mechaniki i Inżynierii Materiałowej w Zakładzie Procesów i Energii we współpracy z Energetycznym Instytutem Badawczym w Holandii (ECN), Jednostka Biomasy, Węgla i Ochrony Środowiska (BKM), Grupa Ciepła i Energii (H&P). Staż naukowo-badawczy (3 lata).

**2005-2010** Adiunkt na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej w Zakładzie Spalania i Detonacji Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów.

**2005-2006** Pracownik naukowy w jednostce badań i rozwoju w firmie EDF R&D we Francji w Departamencie Mechaniki i Wytrzymałości Materiałów. Staż naukowo-badawczy (6 miesięcy)

**2004-2005** Asystent naukowo-dydaktyczny w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej na wydziale Mechaniczno-Energetycznym. Kierownik Laboratorium Spalania w Zakładzie Spalania i Detonacji.

**2003-2004** Starszy referent inżynieryjno-techniczny w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej

**1999-2002** Asystent naukowo-dydaktyczny w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):

#### 4.1. tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

### **EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA PROCESU POZYSKIWANIA BIOMASY ODPADOWEJ W POSTACI GAŁĘZI Z PRZYCINANIA DRZEW JABŁONIOWYCH DLA CELÓW ENERGETYCZNYCH**

Osiągnięcie dokumentuje cykl 6 publikacji powiązanych tematycznie, wydanych po uzyskaniu przez wnioskodawcę stopnia naukowego doktora.

#### 4.2. (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy)

- A) **Dyjakon A.**, Den Boer J., Bukowski P., Adamczyk F., Frąckowiak P. (2016): Wooden biomass potential from apple orchards in Poland, *Drewno*, Vol. 59, No. 198., pp. 73-86 (15 punktów MNiSW, IF = 0,642). Mój udział procentowy wynosi 80%.
- B) **Dyjakon A.**, Mudryk K. (2018): Energetic Potential of Apple Orchards in Europe in Terms of Mechanized Harvesting of Pruning Residues, *Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation* Mudryk K., Werle S. (eds) . Springer Proceedings in Energy. Springer, Cham, 2018, 593-602. (15 punktów MNiSW, Indeksowane w WoS). Mój udział procentowy wynosi 90%.
- C) **Dyjakon A.** (2018): Harvesting and Baling of Pruned Biomass in Apple Orchards for Energy Production. *Energies*, 11, 1680. (25 punktów MNiSW, IF = 2,676). Mój udział procentowy wynosi 100%.
- D) **Dyjakon A.** (2018): The influence of the use of windrowers in baler machinery on the energy balance during pruned biomass harvesting in the apple orchard. *Energies*, 11, 3236. (25 punktów MNiSW, IF = 2,676). Mój udział procentowy wynosi 100%.
- E) **Dyjakon A.** (2019): The influence of apple orchard management on energy performance and pruned biomass harvesting for energetic applications. *Energies*, 12, 632. (25 punktów MNiSW, IF = 2,676). Mój udział procentowy wynosi 100%.
- F) **Dyjakon A.**, Den Boer J., Szumny A., Den Boer E. (2019): Local energy use of biomass from apple orchards – an LCA study, *Sustainability*, 11, 1604 (20 punktów MNiSW, IF = 2,075). Mój udział procentowy wynosi 60%.

#### **ŁĄCZNIE (OSIĄGNIĘCIE):**

- Impact factor: **10,745<sup>a</sup>**
- Punkty MNiSW: **125<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> IF w roku wydania publikacji, w przypadku publikacji z roku 2018 i 2019 podano ostatni dostępny IF

<sup>b</sup> Punktacja MNiSW określona według roku wydania publikacji, w przypadku publikacji z roku 2018 i 2019 przyjęto aktualną punktację z listy z dnia 31 grudnia 2016



### **4.3 Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.**

#### **4.3.1. Wprowadzenie**

##### Podstawa podjęcia tematu i badań naukowych:

Biorąc pod uwagę fakt, że Polska charakteryzuje się największą powierzchnią sadów jabłoniowych w Europie, a biomasa odpadowa powstająca podczas corocznego przycinania drzew może stanowić dodatkowe źródło energii na rynku lokalnym do produkcji ciepła w kotłach grzewczych przyczyniając się w ten sposób do ograniczenia spalania paliw kopalnych oraz zmniejszenia emisji dwutlenku węgla do atmosfery, istotne jest zbadanie potencjału energetycznego oraz możliwości jej efektywnego pozyskania. Przy czym, w procesie zbioru biomasy odpadowej dla celów energetycznych, ważnym zagadnieniem są także poniesione nakłady energetyczne, które mają związek z efektywnością energetyczną procesów realizowanych w rolnictwie oraz ilością energii zużywanej przez ten sektor gospodarki.

Obecnie, biomasa w postaci ściętych gałęzi z sadów jabłoniowych, zagospodarowywana jest w zdecydowanej większości (ponad 90%) poprzez jej rozdrabnianie i pozostawianie powstałej zrębki w sadzie, lub jej usuwanie na skraj sadu i spalanie w pryzmie bez odzysku energii. Obie metody nie przynoszą żadnych korzyści energetycznych, finansowych, ani środowiskowych. Co więcej, wymagają nakładów energetycznych i nakładów pracy, które dodatkowo podnoszą koszty produkcji gospodarstwa/przedsiębiorstwa sadowniczego. Taki sposób postępowania z biomasą odpadową wynika przede wszystkim z braku wystarczającej wiedzy wśród sadowników w zakresie jej alternatywnego wykorzystania w celach energetycznych oraz braku informacji odnośnie bilansu energetycznego (energii włożonej i uzyskanej) procesu pozyskiwania biomasy, aspektów ekonomicznych oraz oddziaływania na środowisko naturalne. Brak odpowiednich i wystarczających danych w fachowej literaturze naukowej na ten temat, zwłaszcza w kontekście zastosowania prasy rolującej zbierającej ścięte gałęzie, był podstawą do podjęcia badań naukowych w tym zakresie.

##### Wprowadzenie:

Obecnie, zmiany klimatyczne są najważniejszym czynnikiem wpływającym na decyzje dotyczące pozyskiwania energii i jej efektywnego wykorzystania. Z tej perspektywy ważnym rozwiązaniem jest zastąpienie paliw kopalnych odnawialnymi źródłami energii i poprawa efektywności energetycznej w procesach produkcyjnych [1]. Wśród źródeł odnawialnych biomasa ma szczególne znaczenie, ponieważ pochodzi z wielu działań w rolnictwie i leśnictwie. Dlatego oczekuje się, że biomasa będzie głównym czynnikiem przyczyniającym się do osiągnięcia celów w zakresie energii odnawialnej [2]. Rolnictwo jest ważną częścią gospodarki w większości krajów. Dostarcza nie tylko żywność na rynek, ale także w różnych formach substraty, produkty końcowe oraz uboczne i odpady możliwe do wykorzystania na cele energetyczne. Na świecie, oprócz samych upraw, generowane są co roku duże ilości pozostałości organicznych, wynoszące około 140 miliardów Mg [3]. W 2012 roku całkowita podaż biomasy na świecie wyniosła 56,2 EJ; z tego tylko 5,6 EJ było związane z dedykowanymi uprawami (3,5 EJ) lub produktami ubocznymi (2,1 EJ) [4]. Przewiduje się jednak, że w przyszłości udział pozostałości rolniczych znacznie wzrośnie [5], a większość tego potencjału powinna być dostępna po stosunkowo niskich kosztach [6]. Ponadto, z ekologicznego, gospodarczego i społecznego punktu widzenia pozyskiwanie biomasy



powinno być zgodne z zamkniętym obiegiem biogospodarki, która obejmuje produkcję odnawialnych zasobów biologicznych i przekształcanie tych zasobów i strumieni odpadów w produkty o wartości dodanej, takie jak bioenergia [7].

Nowoczesne rolnictwo wymaga nakładu energii na wszystkich etapach produkcji rolnej. Końcowe zużycie energii przez sektor rolny w UE-28 wynosi około 2,2% [8]. Jednak rolnictwo charakteryzuje się nieproporcjonalnie wysokim wskaźnikiem przyczyniającym się do zmian klimatu, dodając 10% całkowitych emisji gazów cieplarnianych w UE-28 [9]. Rolnictwo, leśnictwo i rybołówstwo mają drugi najwyższy współczynnik intensywności emisji gazów cieplarnianych (stosunek emisji gazów cieplarnianych do wartości dodanej brutto) w UE-28. W 2014 roku, wskaźnik ten oszacowano na 2,7 kg ekwiwalentów CO<sub>2</sub> na 1 euro [10]. Stąd, korzystne zmiany tego stanu rzeczy na wszystkich etapach logistycznego łańcucha działalności rolniczej są ważne z punktu widzenia oszczędności energii, efektywności energetycznej i redukcji emisji zanieczyszczeń do atmosfery.

Sektor rolny jest nie tylko konsumentem energii, ale ma również potencjał do produkcji i dostarczania energii na rynek, zwłaszcza w różnych formach biomasy. Ze względu na lokalną dostępność, biomasa może zwiększyć bezpieczeństwo zasobów paliwa i zmniejszyć emisję dwutlenku węgla [11]. Biomasa stanowi ponad 60% obecnej produkcji energii odnawialnej w UE-28, a większość pochodzi z biomasy stałej [12]. Ze względu na liczne zalety korzystania z biomasy, wiele uwagi poświęcono opracowaniu zaawansowanych technologii umożliwiających ich konwersję do paliw i użytecznej energii. Głównym źródłem biomasy stałej jest leśnictwo [13], ale znaczące ilości produkowane są również przez rolnictwo, w tym rośliny energetyczne i pozostałości rolnicze (biomasa odpadowa) [14].

Biomasa odpadowa obejmuje wszystkie materiały organiczne, które są wytwarzane jako produkty uboczne z działalności rolniczej. Pozostałości te stanowią znaczną część całkowitej rocznej produkcji biomasy i są ważnym źródłem energii zarówno dla gospodarstw domowych, jak i zakładów przemysłowych (elektrowni czy elektrociepłowni). Na biomasę odpadową składają się pozostałości polowe (np. słoma, ścięte gałęzie drzew owocowych) i pozostałości procesowe (np. wytloki, melasa).

Polska dostarcza na rynek owoców około 3,1 mln Mg jabłek [15], co daje jej trzecie miejsce w świecie. Produkcja tak dużej ilości jabłek wymaga również skutecznego uprawiania znacznych obszarów sadu. Aby utrzymać dobrą wydajność owoców, przycinanie drzew winno być wykonywane co roku. Zazwyczaj przycinanie odbywa się w okresie zimowo-wiosennym (w miesiącach od stycznia do kwietnia) w zależności od lokalnego klimatu, warunków pogodowych lub odmiany jabłek [16, 17, 18]. Ścięte gałęzie są rozproszone na ziemi i wymagają usunięcia dla umożliwienia prowadzenia dalszych procesów związanych z produkcją jabłek (np. nawożenie, opryski). Obecnie, najpopularniejszymi rozwiązaniami jest usuwanie gałęzi z międzyrzędzi i spalanie na skraju sadu w przyzmię bez odzysku energii, lub przejazd ciągnika rolniczego wyposażonego w mulczer do rozdrabniania gałęzi i pozostawienie ich w sadzie jako źródła próchnicy. Działania te wymagają jednak nakładów energii, użytkowania maszyn i dodatkowych kosztów pracy bez bezpośrednich korzyści dla przedsiębiorcy [19]. Należy zauważyć, że ścięta biomasa wprowadza z powrotem do gleby pewne minerały i pierwiastki, które wspomagają proces uprawy drzew, zmniejszając wykorzystanie nawozów [20, 21, 22]. Z drugiej jednak strony, rozdrobnione gałęzie zawierają często szkodniki, małe gryzonie, grzyby i bakterie, które mogą mieć negatywny wpływ na produktywność drzew owocowych i powodować dalszy rozwój chorób szkodliwych dla drzew [23, 24]. W efekcie, pozostawienie rozdrobnionych gałęzi w sadach może prowadzić do długoterminowego obniżenia produktywności owoców, a w konsekwencji do strat



finansowych. Przekształcenie ściętej biomasy odpadowej w ciepło użytkowe wydaje się być bardzo dobrym rozwiązaniem dla właścicieli sadów [25], gdyż może przynosić także korzyści ekonomiczne i środowiskowe wynikające ze sprzedaży biomasy odpadowej (jako paliwa) dla celów energetycznych [26]. Taki kierunek wykorzystania biomasy na rynkach lokalnych prowadzi do rozwoju zdecentralizowanych systemów grzewczych i zrównoważonego zarządzania energią. Ponadto, spalanie biomasy z sadów w kotłach małej i średniej mocy zmniejsza zużycie paliw kopalnych i jednocześnie ogranicza emisję zanieczyszczeń do środowiska [25, 27]. Niestety, biomasa produkowana na plantacjach owoców nie jest powszechnie wykorzystywana do produkcji energii. Wynika to przede wszystkim z braku wystarczających informacji na temat ilości i jakości takiej biomasy odpadowej (potencjału energetycznego), nakładów i zysków energetycznych oraz kosztów/zysków związanych z takim kierunkiem jej wykorzystania.

**Na podstawie dokonanego przeglądu literatury stwierdzam, że w literaturze naukowej niewiele jest danych dotyczących potencjału biomasy z przycinania drzew jabłoniowych w Polsce, czy Europie. Nie znalazłem również analiz energetycznych związanych z procesem jej pozyskiwania w sadzie z wykorzystaniem prasy rolującej (i dodatkowego wyposażenia), czy wpływu strategii zarządzania ściętymi gałęziami w sadzie na proces jej zbioru i końcowy bilans energii. Brak także kompleksowej analizy środowiskowej LCA całego ciągu logistycznego ukierunkowanego na wykorzystanie takiej biomasy odpadowej do produkcji ciepła. W związku z tymi brakami w literaturze przedmiotu powstaje pytanie: czy można określić potencjał biomasy z przycinania drzew jabłoniowych i czy pozyskanie ich na cele energetyczne z wykorzystaniem prasy rolującej jest uzasadnione nie tylko pod względem energetycznym, ale również ekonomicznym i środowiskowym?**

Zagadnienia powyższe są bardzo istotne, ponieważ poprawa efektywności energetycznej w rolnictwie jest kluczowym zagadnieniem w kontekście zrównoważonego rozwoju, zmniejszenia energochłonności procesów produkcyjnych oraz ograniczenia negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne.

#### **4.3.2. Sformułowanie problemu badawczego i cel pracy**

W związku z wykazaniem braku wystarczającej wiedzy w literaturze naukowej w powyższych zagadnieniach należy zadać pytanie: czy bilans energii kompletnego ciągu logistycznego (zbiór, magazynowanie, transport do użytkownika) procesu pozyskiwania w sadzie jabłoniowym biomasy w postaci ściętych gałęzi dla celów energetycznych w warunkach lokalnych jest dodatni oraz, jakie czynniki mają decydujący wpływ na wartość tego bilansu. Co więcej, z utylitarnego punktu widzenia istotne jest również określenie, czy taki sposób zagospodarowania gałęzi może przynieść wymierne korzyści ekonomiczne i jakie ma konsekwencje dla środowiska naturalnego w porównaniu do aktualnej metody postępowania z gałęziami, polegającej na ich rozdrobnieniu za pomocą mulczera i pozostawieniu w sadzie jako źródła próchnicy.

Celem głównym badań była zatem analiza bilansu energetycznego całego ciągu logistycznego zagospodarowania gałęzi z przycinania drzew jabłoniowych z użyciem prasy rolującej. Osiągnięcie celu głównego było możliwe dzięki realizacji celów cząstkowych, takich jak:

1. analiza potencjału biomasy odpadowej z przycinania drzew jabłoniowych w kontekście ich energetycznego wykorzystania,



2. analiza bilansu energetycznego procesu zbioru biomasy odpadowej w sadzie dla celów energetycznych oraz pozostałych elementów ciągu logistycznego,
3. określenie czynników decydujących o bilansie energetycznym zaproponowanego ciągu logistycznego,
4. porównanie zaproponowanego rozwiązania wykorzystania biomasy odpadowej w celach energetycznych z dotychczasowym systemem, polegającym na rozdrabnianiu gałęzi i pozostawianiu powstałej zrębki w sadzie, jako źródła próchnicy,
5. analiza wpływu wykorzystania biomasy odpadowej z sadów dla celów energetycznych na aspekty środowiskowe przy wykorzystaniu analizy LCA, oraz, z uwagi na kontekst aplikacyjny,
6. ocena ekonomiczna zasadności zbioru biomasy odpadowej z sadów jabłoniowych i jej wykorzystania do produkcji energii.

Do realizacji założonego celu głównego pracy konieczne było:

1. przeprowadzenie w sadach jabłoniowych badań terenowych dotyczących analizy ilości powstającej biomasy odpadowej w postaci ściętych gałęzi,
2. określenie nakładów energetycznych podczas zbioru gałęzi w sadzie za pomocą prasy rolującej i pozostałych procesów całego ciągu logistycznego, oraz podczas jej rozdrabniania z użyciem mulczera,
3. wyznaczenie istotnych wskaźników energetycznych,
4. przeprowadzenie badań procesu zbioru biomasy odpadowej za pomocą prasy rolującej bez i z dodatkowymi nagarniaczami gałęzi,
5. przeprowadzenie badań procesu zbioru biomasy przy użyciu prasy rolującej w sadzie ukierunkowanym na zbiór biomasy odpadowej dla celów energetycznych oraz w sadzie tradycyjnym z rozproszonym materiałem organicznym,
6. dokonanie analizy cyklu życia rozpatrywanej technologii i aktualnego sposobu zagospodarowania gałęzi,
7. określenie kosztów procesu zbioru biomasy odpadowej dla celów energetycznych przy założonym jej lokalnym wykorzystaniu w kotłach grzewczych średniej mocy,
8. określenie kosztów procesu mulczowania gałęzi w sadzie,
9. przeprowadzenie analizy wrażliwości wybranych czynników wpływających na potencjał zbioru biomasy dla celów energetycznych.

W powyższych badaniach, poza metodami analitycznymi, wykorzystano również oprogramowanie do analizy LCA (Program GaBi).

Przyjęto następujące hipotezy badawcze:

**Hipoteza 1:** Biomasa odpadowa w postaci ściętych gałęzi z drzew jabłoniowych stanowi istotny potencjał do wykorzystania na rynku lokalnym, a bilans energii wynikający z jej zbioru w sadzie dla celów energetycznych jest dodatni.

**Hipoteza 2:** Zastosowanie dodatkowych nagarniaczy i właściwe przygotowanie sadu do procesu zbioru biomasy odpadowej dla celów energetycznych poprawia bilans energii i przynosi korzyści ekonomiczne, a efekt końcowy zależy przede wszystkim od ilości zebranej biomasy.

**Hipoteza 3:** Wykorzystanie gałęzi jako paliwa do produkcji ciepła prowadzi do większych korzyści środowiskowych, zwłaszcza ograniczenia emisji CO<sub>2</sub>, w odniesieniu do aktualnej metody zagospodarowania gałęzi polegającej na ich rozdrabnianiu za pomocą mulczyrów i pozostawianiu w sadzie, jako źródła próchnicy.



### 4.3.3. Opis osiągnięcia naukowego

Ze względu na znaczenie polskiego rynku owoców zarówno na poziomie krajowym, jak i międzynarodowym, bardzo ważne jest określenie potencjału ściętych gałęzi z drzew owocowych w danych regionach Polski, zwłaszcza z sadów jabłoniowych. W publikacji A przedstawiono wyniki badań własnych w sadach jabłoniowych oraz dostępne dane literaturowe, na podstawie których przyjąłem do dalszej analizy średnią wartość masy biomasy odpadowej (w stanie roboczym) z przycinania rocznego wynoszącą  $3,5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ , przy zawartości wilgoci w badanych próbkach około 40-45%. Ciepło spalania biomasy odpadowej ( $Q_s$ ) było w zakresie  $18,0\text{-}19,3 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Do dalszych obliczeń przyjąłem wartość  $Q_s = 18,5 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Następnie, na podstawie przyjętych danych oraz analizie rozkładu wielkości sadów jabłoniowych w Polsce, określiłem potencjał teoretyczny, techniczny i ekonomiczny.

W efekcie, stwierdziłem, że w Polsce całkowity teoretyczny potencjał pozostałości biomasy odpadowej po regularnym przycinaniu jabłoni w sadach wynosi  $12,5 \text{ PJ}\cdot\text{rok}^{-1}$ , przy czym ten potencjał energetyczny nie jest równomiernie rozłożony w całym kraju. Największy potencjał występuje w województwie mazowieckim, osiągając wartość  $4,8 \text{ PJ}\cdot\text{rok}^{-1}$ . Jest to znacząca ilość energii z biomasy i stanowi prawie 40% krajowego potencjału przycinanej biomasy z sadów jabłoniowych. Kolejne województwa o znaczącym potencjale to: lubelskie, łódzkie, świętokrzyskie i zachodniopomorskie. Ich wspólny potencjał określiłem na wartość około  $5,2 \text{ PJ}\cdot\text{rok}^{-1}$  (ok. 42%). Najniższe potencjały uzyskałem dla województwa opolskiego i śląskiego, dając łącznie tylko ok.  $0,11 \text{ PJ}\cdot\text{rok}^{-1}$ , co stanowi mniej niż 1% badanego potencjału krajowego wynikającego z przycinania jabłoni.

Potencjał techniczny biomasy z przycinania sadów określiłem na ok.  $10,0 \text{ PJ}\cdot\text{rok}^{-1}$ , a potencjał ekonomiczny na nieco ponad  $8,0 \text{ PJ}\cdot\text{rok}^{-1}$ . Na podstawie uzyskanych wyników stwierdziłem, że chociaż potencjał ekonomiczny jest o prawie 40% niższy od teoretycznego, wartość ta jest nadal wysoka i może odgrywać ważną rolę na lokalnym rynku biomasy, zwłaszcza do zasilania małej i średniej mocy kotłów, co ma również wpływ na aspekty środowiskowe i ograniczenie potrzeby spalania paliw kopalnych. Przyjmując, że potencjał ekonomiczny bioenergii z przycinania jabłoni jest porównywalny z energią pochodzącą ze spalania typowego węgla kamiennego w kotłach domowych (dla węgla  $Q_s = 26 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), określiłem także możliwe ograniczenie spalania węgla w ilości około  $0,31 \text{ mln Mg}\cdot\text{rok}^{-1}$ . Ponadto, biorąc pod uwagę reakcję spalania stechiometrycznego i zawartość pierwiastka węgla w węglu kamiennym w ilości  $c=65\%$ , oszacowałem teoretyczne zmniejszenie emisji  $\text{CO}_2$  do atmosfery o  $0,75 \text{ mln Mg}\cdot\text{rok}^{-1}$ .

Rozszerzeniem zagadnienia potencjału energetycznego w Polsce, było określenie także potencjału energetycznego sadów jabłoniowych w krajach UE (publikacja B). Na podstawie dokonanych założeń i obliczeń wykazałem, że całkowity teoretyczny potencjał energetyczny biomasy odpadowej pozostałej po cięciu drzew w sadach jabłoniowych w 28 krajach UE wynosi  $29,11 \text{ PJ}\cdot\text{rok}^{-1}$ , ale jest również rozproszony. Z jednej strony są kraje o znacznym potencjale, jak Polska, której potencjał stanowi ponad 30%. Kolejnymi krajami o istotnym potencjale są Włochy, Rumunia, Francja i Niemcy o wartościach  $3,38 \text{ PJ}\cdot\text{rok}^{-1}$ ,  $3,32 \text{ PJ}\cdot\text{rok}^{-1}$ ,  $2,38 \text{ PJ}\cdot\text{rok}^{-1}$  i  $2,05 \text{ PJ}\cdot\text{rok}^{-1}$ , odpowiednio. Z drugiej strony najniższy potencjał znajduje się na Malcie, w Luksemburgu, na Cyprze i w Estonii. W tych czterech krajach sumaryczny potencjał wynosi poniżej  $0,08 \text{ PJ}\cdot\text{rok}^{-1}$ .

Dodatkowo, na podstawie analizy danych wieku sadów jabłoniowych i gęstości nasadzeń stwierdziłem, że kierunek rozwoju sadów jabłoniowych zmienia się na korzyść z komercyjnego i technicznego punktu widzenia wykorzystania biomasy z przycinania drzew



jabłoniowych dla celów energetycznych. Obecnie, typ sadów zmienia się z tradycyjnego (do 800 drzew na hektar) w intensywny (ponad 1 600 drzew na hektar). Konsekwencją tej zmiany jest gęste nasadzenie drzew w rzędach, niezbędne regularne przycinanie drzew każdego roku, oraz bardziej jednolity rozmiar ciętych gałęzi (grubość i długość), co sprzyja ograniczeniu liczby nawrotów/skrętów i awarii, oraz ułatwia proces mechanicznego ich zbioru. W efekcie, powinno to zwiększyć wydajność i efektywność pracy maszyn zbierających biomasa odpadową w sadach jabłoniowych.

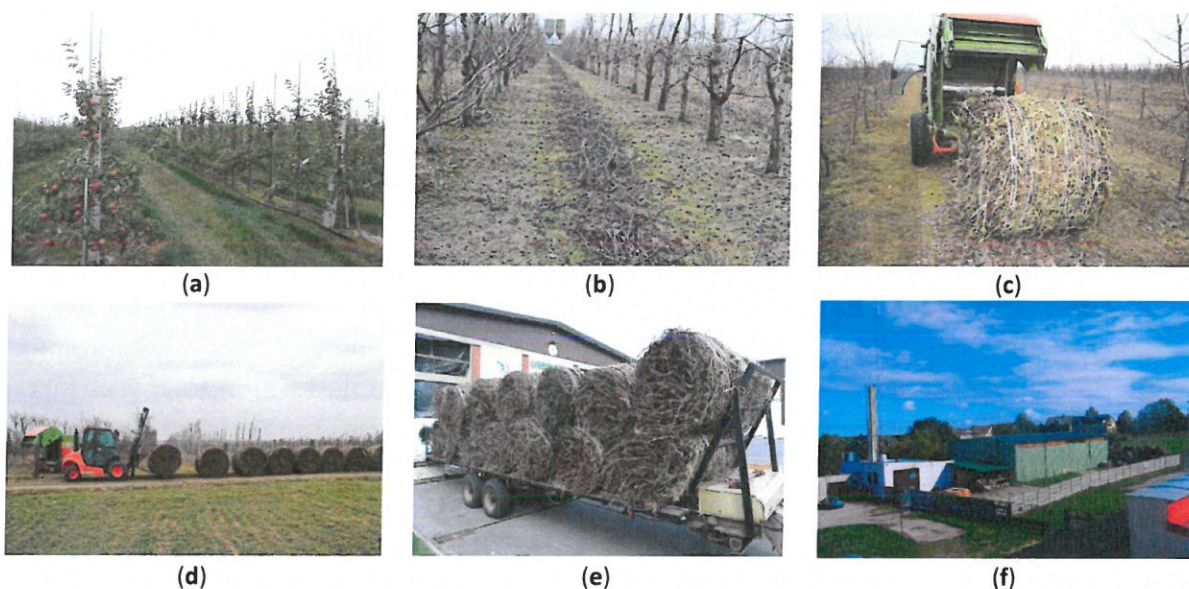
Wyniki przedstawione w publikacjach **A** oraz **B** wykazały przede wszystkim istnienie potencjału energetycznego biomasy odpadowej z takiego obszaru działalności rolniczej, który do tej pory nie był właściwie zagospodarowany. Z uwagi na formę gałęzi oraz fakt, że jest to biomasa odpadowa pochodząca z upraw trwałych (drzewa nie są wycinane), jej zbiór wymaga użycia odpowiednich maszyn [28, 29], co związane jest z zapotrzebowaniem na dodatkową energię do zbioru, przetwarzania, przechowywania i transportu w celu przygotowania takiej biomasy do celów energetycznych [30, 31]. W przypadku biomasy sadowniczej, konieczne jest zastosowanie odpowiedniej technologii, ponieważ maszyny do jej zbioru muszą poruszać się między rzędami drzew, a gałęzie są rozproszone. Biomasa sadownicza jest zwykle zbierana w postaci rozdrobnionej lub w postaci balotów (bel) [32]. Częściej stosowaną technologią jest zbiór gałęzi przez układ podbieracza, ich zrębkowanie i wyrzut powstałej zrębki do odpowiedniego zbiornika/pojemnika/worka magazynującego [33]. Alternatywnym rozwiązaniem jest belowanie przycinanej biomasy przy użyciu prasy rolującej [29]. W przypadku belowania, istotną zaletą jest możliwość łatwego i bardzo taniego ich magazynowania na otwartym terenie. Dodatkowo, możliwe jest jej naturalne suszenie, ponieważ wewnątrz beli jest dużo wolnej przestrzeni dla przepływu powietrza, co prowadzi do zmniejszenia zawartości wilgoci do poziomu akceptowalnego dla ich energetycznego wykorzystania.

W literaturze istnieje kilka publikacji naukowych związanych z przycinaniem drzew oliwnych, winorośli czy niektórych drzew owocowych i dotyczą one nakładów oraz przepływu energii, kosztów jednostkowych, produkcji biomasy i kosztów inwestycyjnych. Jednak dotychczasowe wyniki skupiły się na produkcji zrębków drzewnych jako produktu końcowego [34,35–37]. Niewiele jest jednak danych dotyczących belowania gałęzi [38], zwłaszcza w odniesieniu do całego ciągu logistycznego wykorzystania gałęzi w celach energetycznych.

Z wagi na brak szerszej wiedzy na ten temat, w publikacji **C** przeprowadziłem szerokie badania i analizy związane ze zbiorem biomasy odpadowej w sadzie jabłoniowym, stosując prasę rolującą przeznaczoną do bezpośredniego zbierania i belowania ściętych gałęzi. System logistyczny (rys. 1) obejmował belowanie biomasy, transport wewnętrzny i tymczasowe magazynowanie wyprodukowanych bel, a także ich transport do kotłowni znajdującej się w niewielkiej odległości od sadu (6 km). Wyniki porównałem z powszechną praktyką pozostawiania rozdrobnionych gałęzi w sadzie przy użyciu ciągnika rolniczego z doczepionym rozdrabniaczem (mulczerelem).

Przeprowadzone przeze mnie badania miały na celu (i) określenie wydajności i kosztów dwóch systemów postępowania ze ściętymi gałęziami, (ii) oszacowanie i porównanie bilansu energetycznego strategii „Gałęzie do Energii” (ang. Pruning to Energy) z systemem ich mulczowania w sadzie, oraz (iii) ocenę wpływu rocznego wykorzystania pracy prasy rolującej, potencjału biomasy sadowniczej w sadzie oraz odległości sadu od kotłowni (końcowego użytkownika) na ekonomiczne aspekty energetycznego wykorzystania ściętych gałęzi.





**Rys. 1.** Strategia "Gałęzie do Energii" w sadzie jabłoniowym: (a) sad jabłoniowy; (b) ścięta gałęzie jako biomasa odpadowa; (c) prasa rolująca z wytworzoną belą; (d) magazynowanie bel w sadzie; (e) platforma do transportu bel; (f) lokalna ciepłownia (2 × 300 kWth).

W odniesieniu do oceny bilansu energii i efektywności energetycznej wykorzystałem odpowiednie wskaźniki przedstawione w tabeli 1.

**Tabela 1.** Wskaźniki energii [39-42].

Wskaźnik	Symbol	Równanie	Jednostka
Bezpośredni wkład energii	DE	$DE_{F,L} = M_{F,L} \times E_{F,L}$	MJ·ha <sup>-1</sup>
Pośredni wkład energii	IDE	$IDE = \left( \frac{M_M \times E_M}{t_{SLM} \times t_M} \right) \times t_{OP}$	MJ·ha <sup>-1</sup>
Całkowity wkład energii	EIF	$EIF = DE + IDE$	MJ·ha <sup>-1</sup>
Energia wyjściowa	EOF	$EOF = PB_{FM} \times \left( \frac{100 - MC_{FM}}{100} \right) \times LHV$	MJ·ha <sup>-1</sup>
Bilans energii	EB	$EB = EOF - EIF$	MJ·ha <sup>-1</sup>
Zwrot energii włożonej	EROI	$EROI = \frac{EOF}{EIF}$	-
Udział energii włożonej	EIS	$EIS = \frac{EIF}{EOF} \times 100\%$	%
Wydajność energetyczna	EP	$EP = \frac{PB_{FM}}{EIF}$	kg FM·MJ <sup>-1</sup>
Energochłonność	EI	$EI = \frac{EOF}{PB_{FM}}$	MJ·kg <sup>-1</sup> FM

$M_{F,L}$  – całkowita ilość paliwa (F) lub oleju/smaru (L) zużytego przez maszynę podczas zbioru biomasy, kg;  $E_{F,L}$  – wartość energetyczna paliwa lub oleju/smaru (51.50 MJ·kg<sup>-1</sup> dla oleju napędowego i 83.7 MJ·kg<sup>-1</sup> dla oleju/smaru), MJ·kg<sup>-1</sup>;  $M_M$  – masa maszyny, kg;  $E_M$  – energia zużyta na wyprodukowanie maszyny, MJ·kg<sup>-1</sup>;  $t_{SLM}$  – całkowita żywotność maszyny, rok;  $t_M$  – przyjęty roczny czas pracy maszyny w sadzie, SMH·rok<sup>-1</sup>;  $t_{OP}$  – skumulowany czas pracy maszyny w sadzie podczas zbioru biomasy, SMH;  $PB_{FM}$  – ilość zebranej biomasy (masa robocza (FM)), t FM·ha<sup>-1</sup>;  $MC_{FM}$  – zawartość wilgoci w masie roboczej, %; LHV – wartość opałowa suchej masy biomasy, MJ·kg<sup>-1</sup>.

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazałem, że w rozpatrywanym łańcuchu logistycznym największy nakład pracy związany jest ze zbiorem i belowaniem gałęzi (51%), następnie z magazynowaniem i załadunkiem bel w sadzie (24%). Transport bel stanowił 10%, natomiast wszelkiego rodzaju opóźnienia (awarie i przestoje) wyniosły 15%.



Obliczenia wykazały przede wszystkim, że całkowity bilans energetyczny strategii „Gałęzie do Energii” z wykorzystaniem prasy rolującej jest dodatni ( $EB = 11,94 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), co sprzyja tej aktywności w przeciwieństwie do procesu mulczowania charakteryzującego się ujemnym bilansem energetycznym w wysokości  $EB = -0,28 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Co więcej, bilans energetyczny zbioru i belowania gałęzi okazał się być ponad dwukrotnie wyższy niż alternatywny system zbioru gałęzi połączony z procesem ich rozdrabniania do postaci zrębki drzewnej ( $EB = 5,24 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Bezpośredni wkład energii do realizacji zbioru i rozdrabniania wynosił  $1,25 \text{ GJ}\cdot\text{ts}\cdot\text{m}^{-1}$  [43], gdzie w przypadku zbioru i belowania wartość ta wyniosła tylko  $0,51 \text{ GJ}\cdot\text{ts}\cdot\text{m}^{-1}$ . Taka różnica wynika głównie z wyższej energii potrzebnej do rozdrobnienia gałęzi do postaci zrębki drzewnej. Niższe zapotrzebowanie na energię do belowania poprawia efektywność energetyczną procesu i wpływa na niższe koszty jego realizacji. Należy jednak zaznaczyć, że warunkiem uzyskania tak korzystnego bilansu energetycznego jest dostęp na rynku lokalnym do instalacji przystosowanej do spalania bel.

Oprócz korzyści energetycznych wskazałem również aspekt środowiskowy, który stanowi wartość dodaną tego łańcucha logistycznego. Wykorzystanie sprasowanej biomasy do celów energetycznych przyczynia się do zmniejszenia emisji  $\text{CO}_2$ . Współczynnik emisji  $\text{CO}_2$  ze spalania węgla (jako alternatywnego paliwa konwencjonalnego) wynosi  $94,7 \text{ kg}\cdot\text{GJ}^{-1}$  [44] lub  $357 \text{ kg}\cdot\text{MWh}^{-1}$  [45]. Biorąc pod uwagę efektywność spalania w kotłach grzewczych (0,92) i niższą wartość opałową biomasy odpadowej ( $Q_d = 18,05 \text{ GJ}\cdot\text{ts}\cdot\text{m}^{-1}$ ), uniknięta emisja dwutlenku węgla wynosi  $1572 \text{ kg}\cdot\text{ts}\cdot\text{m}^{-1}$ . Ponieważ produktywność zbioru biomasy w rozpatrywanym sadzie wynosiła  $0,69 \text{ ts}\cdot\text{m}\cdot\text{ha}^{-1}$  rocznie, ekwiwalent emisji  $\text{CO}_2$  wyniósł ok.  $1085 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  rocznie.

Z praktycznego punktu widzenia ważne są również koszty zbioru biomasy. W przeprowadzonych przeze mnie badaniach ostateczny koszt wyliczyłem na  $83,3 \text{ €}\cdot\text{ha}^{-1}$  ( $121,1 \text{ €}\cdot\text{ts}\cdot\text{m}^{-1}$ ). Jednak w przypadku sadów jabłoniowych wartość ta może zostać zmniejszona, ponieważ unika się w ten sposób kosztów mulczowania (niezbędna operacja do wykonania przez sadownika w przypadku rezygnacji z jej energetycznego wykorzystania). Uwzględniając koszt mulczowania w wysokości  $46,43 \text{ €}\cdot\text{ha}^{-1}$ , koszt cyklu „Gałęzie do Energii” obniża się odpowiednio do poziomu  $36,8 \text{ €}\cdot\text{ha}^{-1}$  lub  $74,7 \text{ €}\cdot\text{ts}\cdot\text{m}^{-1}$ . Wartość ta wydaje się być atrakcyjna w porównaniu do wartości rynkowej zrębków drzewnych na rynku europejskim od 100 do prawie  $300 \text{ €}\cdot\text{ts}\cdot\text{m}^{-1}$  [36, 43]. Ten pozytywny wynik jest jednak ograniczony do warunku, że w bliskim sąsiedztwie sadu jabłoniowego znajduje się jednostka grzewcza przystosowana do spalania bel. Należy również podkreślić, że całkowity koszt zbioru i belowania zależy także od wielkości sadu zarządzanego przez sadownika oraz ilości możliwej do pozyskania biomasy odpadowej. W przypadku małych sadów i nieefektywnego wykorzystania maszyn koszt może znacznie wzrosnąć. Z kolei, duży potencjał zbioru biomasy i efektywne wykorzystanie maszyn w sadach o dużej powierzchni (100 ha i więcej) prowadzą do dalszego obniżenia kosztów i wzrostu opłacalności realizacji strategii „Gałęzie do Energii” (szczegółowe wyniki i wykresy zawarto w **publikacji C**).

Zgodnie z wynikami badań zawartych w **publikacji C**, zbiór biomasy w sadzie jest najbardziej energochłonną operacją ze wszystkich etapów (zbieranie, przechowywanie i transport na bliską odległość) strategii „Gałęzie do Energii”. Jednocześnie, przegląd literatury dokonany w **publikacjach C, D, E** oraz inne badania własne i testy zrealizowane w trakcie realizacji projektu Europruning (program FP7), w którym uczestniczyłem wykazały, że wiele parametrów i czynników wpływa na wydajność i straty biomasy, a tym samym na bilans energetyczny. W pracy Spinelli i in. [46] testy wykazały, że ustawienia podbieracza (wysokość podnoszenia nad poziomem gruntu) wpływają na wydajność i straty zbiorów. Wyższe



ustawienia spowodowały wzrost strat w zbiorach ściętych gałęzi (średnia strata w zbiorach wahała się od 0,4 do 6%). Autorzy doszli do wniosku, że straty w zbiorach zależą głównie od typu maszyny. Zastosowanie małych pras do belowania w regionie górskim pokazało, że na wydajność zbioru ściętych gałęzi może mieć również wpływ nachylenie terenu. Wyższe straty w zbiorach zaobserwowano dla większych stoków w winnicach. Jednak, ilość zużywanej energii może zostać poprawiona dzięki lepszemu zarządzaniu pozostałościami w sadach upraw stałych. Na przykład ręczne przycinanie winnic doprowadziło do mniejszych strat w porównaniu do cięcia zmechanizowanego (17–38% w przypadku ręcznego i około 48% w przypadku zmechanizowanego) [36].

Innym problemem jest to, że maszyna jest raczej węższa niż odległość między rzędami drzew, a ścięte gałęzie są rozrzucone wzdłuż trasy przejazdu maszyny. Tak więc, zebranie ściętych gałęzi w środku międzyrzędzi, jest jedną z metod poprawy procesu. W związku z tym, aby ograniczyć straty w zbiorach, maszyny mogą być wyposażone w specjalne zgrabiarki, które nagarniają gałęzie do podbieracza maszyny [47]. Jednak użycie dodatkowych nagarniaczy (zgrabiarek) może spowodować wzrost zużycia paliwa, co prowadzi do wyższych kosztów i nakładów energii w procesie ich zbioru. Zagadnienie to nie było w tym zakresie dotychczas analizowane w literaturze naukowej, stąd podjąłem się tego zagadnienia, a wyniki prac zawarłem w **publikacji D**.

Celem badań przedstawionych w **publikacji D** było zbadanie przepływu (bilansu) energii w sadzie jabłoniowym podczas zbioru biomasy przycinanej do celów energetycznych w dwóch wariantach operacyjnych: (1) praca prasy rolującej bez nagarniaczy (2) praca prasy rolującej z nagarniaczami. W ramach tej pracy określono odpowiednie wskaźniki energetyczne, w tym energię netto, stosunek energii uzyskanej do energii włożonej, produktywność energii i energię właściwą, a ze względów użytkowych także koszty związane ze zbiorem biomasy odpadowej dla celów energetycznych.

W efekcie dokonanych analiz stwierdziłem, że bez dodatkowych nagarniaczy wydajność zbioru biomasy odpadowej (ściętych gałęzi) w badanych sadach wynosiła 3,31 tś.m. $\cdot$ ha<sup>-1</sup> (Sad 1) i 2,89 tś.m. $\cdot$ ha<sup>-1</sup> (Sad 2), co osiągnięto przy ok. 40% strat w zbiorach. Tak wysokie straty zbiorów były spowodowane bardzo wąskim zakresem pracy prasy rolującej, ograniczonej do szerokości tylko 1,75 m. Zastosowanie dodatkowych nagarniaczy spowodowało zwiększenie zasięgu działania do 3,4 m, co doprowadziło do poprawy procesu zbioru i znacznego zmniejszenia strat w obu sadach jabłoniowych do poziomu ok. 20%. W rezultacie wydajność zbioru wzrosła do wartości 4,15 tś.m. $\cdot$ ha<sup>-1</sup> (Sad 1) i 3,85 tś.m. $\cdot$ ha<sup>-1</sup> (Sad 2). Wartości te są wyższe niż średni potencjał biomasy przycinania (3,50 tś.m. $\cdot$ ha<sup>-1</sup>) określony dla sadów jabłoniowych w Polsce (**publikacja A**). Wysoki potencjał przycinanej biomasy jest bardzo ważny z punktu widzenia strategii PtE, ponieważ czyni tę technologię atrakcyjną dla sadowników.

Jednak użycie nagarniaczy spowodowało wzrost zużycia paliwa przez zestaw maszynowy, a także wydłużyło czas pracy potrzebny do oczyszczenia jednego hektara sadu jabłoniowego. Wydłużenie czasu wynika z faktu, że maszyna zbierająca więcej ściętych gałęzi z szerszego obszaru musi poruszać się wolniej, aby zgarniacze mogły przesuwając materiał do systemu podbierającego prasy rolującej. Podobne obserwacje poczynili inni badacze podczas zbioru miska za pomocą technologii belowania [48]. W konsekwencji czas działania wydłużył się z 1,09 SMH $\cdot$ ha<sup>-1</sup> do 1,32 SMH $\cdot$ ha<sup>-1</sup> (Sad 1) oraz z 0,92 SMH $\cdot$ ha<sup>-1</sup> do 1,18 SMH $\cdot$ ha<sup>-1</sup> (Sad 2). W rezultacie wskaźnik ten wzrósł odpowiednio o ponad 21% i 28%. Wyższe wartości czasu pracy uzyskane dla Sadu 1 w porównaniu z Sadem 2 dodatkowo potwierdzają tę korelację, ponieważ Sad 1 miał większą wydajność zbioru biomasy. Większe ilości zebranej



biomasy wpłynęły na dodatkowe obciążenie prasy rolującej, co spowodowało większe zużycie paliwa przez ciągnik.

Parametry te wpłynęły zarówno na wskaźnik bezpośredniej energii włożonej wymagany podczas procesu zbioru w sadzie jabłoniowym, jak i na wskaźnik energii wyjściowej reprezentowany przez energię zgromadzoną w zebranej biomase. Biorąc pod uwagę te zależności, ważne jest określenie czy proces zbioru biomasy odpadowej (bez nagarniaczy) charakteryzuje się dodatnim czy ujemnym bilansem energii, a także czy wykorzystanie nagarniaczy przynosi dodatkowe korzyści energetyczne dla strategii „Gałęzie do Energii”. Przeprowadzone w tym zakresie obliczenia wykazały, że całkowity bilans energetyczny jest pozytywny dla obu wariantów operacyjnych. Przy czym, warianty z wykorzystaniem nagarniaczy charakteryzowały się jednak wyższymi wartościami EB. W rozpatrywanych przypadkach wzrost wyniósł 25% w Sadzie 1 i 33% w Sadzie 2. Zatem, większa energia została zgromadzona w całkowitej ilości zebranej biomasy w porównaniu z dodatkową wykorzystaną energią zawartą w paliwie i smarach do zasilania ciągnika i prasy rolującej. Ta korelacja jest potwierdzona przez bardzo niski wskaźnik EIS, który był nieco powyżej 1% i wysoki wskaźnik EROI przekraczający wartość 80. Także analiza wrażliwości wykazała, że zmiana zużycia paliwa podczas procesu zbioru nie jest tak istotna, jak wydajność zbioru biomasy odpadowej.

Przeanalizowałem także aspekty ekonomiczne, gdyż są niezbędne do praktycznej realizacji strategii „Gałęzie do Energii”. Analiza wykazała, że dla obu sadów, godzinowe koszty eksploatacji były zbliżone (około 46 €·SMH<sup>-1</sup>). Koszt ten jest wprawdzie wyższy o około 15–20% od kosztów procesu mulczowania, jednak technologia belowania jest tańsza niż system zrębkowania gałęzi, którego koszty szacuje się na około 65 €·SMH<sup>-1</sup> [43]. Odnosząc koszty do jednego hektara sadu jabłoniowego, różnica między wariantami z lub bez nagarniaczy była znacząca. Wykorzystanie nagarniaczy zwiększyło koszty zbioru z jednego hektara o 23% w Sadzie 1 i o 30% w Sadzie 2. Głównym tego powodem był dłuższy czas pracy wymagany do zebrania biomasy odpadowej z jednego hektara. Jednak, użycie nagarniaczy zwiększyło wydajność zbioru, co spowodowało wyższe przychody ze sprzedaży biomasy. Zatem, dzięki poprawie procesu zbioru z wykorzystaniem nagarniaczy (więcej zebranej biomasy), dodatkowe koszty zbioru są z nadlatkiem kompensowane wyższymi dochodami ze sprzedaży.

Ostatnim zagadnieniem w kontekście bilansu energii było wykazanie wpływu zarządzania biomasa odpadową w sadzie na jej pozyskiwanie dla celów energetycznych (**publikacja E**). W literaturze naukowej nie znalazłem bowiem bezpośredniego porównania ilości zebranej biomasy i bilansów energetycznych w sadach jabłoniowych zorientowanych na wykorzystanie ściętych gałęzi do celów energetycznych (przycinanie gałęzi i ich zgarńnięcie do środka) z sadami prowadzonymi w sposób tradycyjny (gałęzie są rozrzucone w sadzie w sposób naturalny wynikający z zabiegu ich ręcznego przycinania). Dane te wydają się być bardzo ważne nie tylko z naukowego, ale także z praktycznego punktu widzenia, ponieważ stwarzają możliwość lepszego wglądu w energetyczne i ekonomiczne aspekty zarządzania sadami w tym zakresie. Na podstawie przeprowadzonych badań w sadzie oraz wykonanych obliczeń stwierdziłem, że w przypadku rozproszonej biomasy w sadzie, wydajność zbioru (przy teoretycznym potencjale 2,50 tś.m·ha<sup>-1</sup>) wyniosła tylko 0,76 tś.m·ha<sup>-1</sup>, co spowodowało znaczne straty w zbiorach wynoszące 69,3%. Z kolei, w sadzie ukierunkowanym na zbiór biomasy dla celów energetycznych, ilość zebranej biomasy odpadowej wyniosła 2,04 tś.m·ha<sup>-1</sup>, przy stratach zbiorów wynoszących 19,1%. W efekcie, niski był także uzysk biomasy w odniesieniu do nakładów pracy w sadzie tradycyjnym (0,54 tś.m·SMH<sup>-1</sup>), który był dwa razy niższy od sadu ukierunkowanego na efektywny zbiór



biomasy odpadowej ( $1,16 \text{ t}\cdot\text{m}\cdot\text{SMH}^{-1}$ ). Należy jednak zwrócić uwagę, że skutkiem zbioru większej ilości biomasy odpadowej było większe zużycie paliwa w sadzie przygotowanym pod zbiór ( $7,73 \text{ dm}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ ) w porównaniu do sadu z rozproszonymi gałęziami ( $5,32 \text{ dm}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ ). W rezultacie, sad przygotowany do zbioru biomasy odpadowej wymagał także większego nakładu pracy w odniesieniu do jednego hektara ( $1,81 \text{ SMH}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), w porównaniu z  $1,49 \text{ SMH}\cdot\text{ha}^{-1}$  dla sadu z rozrzuconymi gałęziami. Więcej biomasy zebranej z jednego hektara wymagało bowiem więcej czasu na jej zbiór, owinięcie sznurkiem i rozładowywanie bel.

Sposób przygotowania sadu znacząco wpłynął na koszty procesu zbioru biomasy odpadowej i jej belowania w sadzie jabłoniowym. W odniesieniu do jednego hektara powierzchni sadu, koszty pracy w sadzie ze zgarniętymi gałęziami wyniosły  $75,42 \text{ €}\cdot\text{ha}^{-1}$  i były o około 15 € wyższe, niż w sadzie z rozrzuconymi gałęziami ( $60,26 \text{ €}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Jednakże, odnosząc koszty operacyjne do jednej tony zebranej biomasy, koszty dla sadu przygotowanego pod zbiór biomasy wyniosły  $36,97 \text{ €}\cdot\text{t}\cdot\text{m}\cdot^{-1}$ , i były o 40 € niższe od kosztów zbioru w sadzie z rozproszonymi gałęziami ( $79,42 \text{ €}\cdot\text{t}\cdot\text{m}\cdot^{-1}$ ). Wskazuje to, że sposób zarządzania oraz potencjał zbioru biomasy mają zasadnicze znaczenie dla kosztów zbioru i końcowych wskaźników ekonomicznych. Co więcej, zwiększenie potencjału zbioru biomasy zmniejsza koszty jednostkowe. W rozważanych wariantach zarządzania koszty zbioru w sadzie z rozproszonymi gałęziami (bardzo niski zbiór biomasy) przekraczały potencjalne zyski ze sprzedaży wyprodukowanych bel. Bilans kosztów zbioru oraz ceny sprzedaży był ujemny i wynosił  $-19,8 \text{ €}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Zatem niewłaściwe zarządzanie lub niski potencjał biomasy może sprawić, że proces zbioru będzie ekonomicznie nieuzasadniony. W przypadku sadu ze zgarniętymi gałęziami, bilans finansowy był dodatni ( $32,1 \text{ €}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) niezależnie od unikniętych kosztów mulczowania.

W kontekście przepływu i bilansu energii oba warianty charakteryzują się pozytywnymi wynikami. Istnieją jednak znaczne różnice w EOF i wreszcie w bilansie energetycznym (EB). Dla przygotowanego sadu pod względem zbioru gałęzi,  $\text{EB}=20,74 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$  i był prawie trzy razy większy niż dla sadu z rozproszonymi gałęziami w sadzie, gdzie  $\text{EB}=7,66 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Taka dysproporcja była spowodowana głównie wysokimi stratami zbiorów ( $69,33\%$ ) dla rozproszonych gałęzi, co znalazło odzwierciedlenie w plonie biomasy wynoszącym zaledwie  $0,76 \text{ t}\cdot\text{m}\cdot\text{ha}^{-1}$  i niskim  $\text{EOF}=7,97 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Z kolei, w przypadku zgarniętych gałęzi w sadzie straty zbiorów były znacznie niższe ( $19,17\%$ ), dając wysoki wskaźnik EOF na poziomie  $21,17 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Aby podkreślić znaczenie i efektywność energetyczną pozyskiwania biomasy z przycinania z sadu na cele energetyczne, określono również wskaźnik EIS. Dla rozproszonego sadu  $\text{EIS} = 3,90\%$  i był mniej więcej dwa razy większy niż dla sadu ze zgarniętymi gałęziami ( $\text{EIS} = 2,05\%$ ). W konsekwencji, skoro wymagany jest większy wkład energii w sadach o zgarniętych gałęziach, a wskaźnik EIS jest pomimo tego jeszcze niższy, to można stwierdzić, że potencjał zbioru PB (ilość zbieranej biomasy) jest najważniejszym wskaźnikiem wpływającym na charakterystykę energetyczną. Dowodzi to, że zarządzanie sadem powinno skupiać się na tworzeniu warunków sprzyjających i ułatwiających proces zbioru, a tym samym zwiększających wskaźnik EB (bilans energii).

Z uwagi na zmiany klimatyczne, strategię zrównoważonego rozwoju oraz dążenie do ograniczenia zużycia paliw kopalnych uznałem, że bardzo ważnym aspektem realizacji ciągu logistycznego strategii wykorzystania gałęzi z przycinania drzew jabłoniowych w celach energetycznych jest jej wpływ na środowisko naturalne. Dodatkowym argumentem za przeprowadzeniem takiej analizy był brak danych w literaturze dotyczących istniejącego pełnego łańcucha logistycznego wdrażającego pozostałości przycinania z sadów jabłoniowych w celach energetycznych. Co więcej, nie znalazłem żadnej analizy LCA



dotyczącej zagadnienia zbioru ściętych gałęzi w postaci bel. W związku z powyższym w publikacji F przeprowadziłem taką ocenę środowiskową w oparciu o analizę LCA z wykorzystaniem programu GaBi. Wyniki porównałem z procesem mulczowania gałęzi w sadzie jako rozwiązaniem odniesienia, które jest powszechnie stosowane w sadach jabłoniowych. W efekcie, za referencyjną jednostkę funkcjonalną przyjąłem ilość zebranych ściętych gałęzi z 1 ha i założyłem, że oba systemy osiągają te same cele końcowe. Dlatego też, w przypadku scenariusza „Gałęzie do Energii” (PtE) uwzględniłem niezbędne dodatkowe nawożenie, które zastąpiło usunięte z sadu ścięte gałęzie. Z kolei, w przypadku scenariusza „Gałęzie do Gleby” (PtS) założyłem alternatywne wytwarzanie ciepła przez konwencjonalną jednostkę grzewczą opalaną węglem kamiennym, aby zrównoważyć końcową energię uzyskaną ze spalania gałęzi w scenariuszu PtE. Przyjęcie węgla kamiennego jako paliwa wzorcowego w scenariuszu PtS wynikało z faktu, że w Polsce ponad 50% gospodarstw domowych jest nadal ogrzewanych tym paliwem [49].

Analiza LCA wykazała, że wskaźnik Potencjał Zmian Klimatu w scenariuszu PtE jest około 10 razy mniejszy niż dla scenariusza PtS. Głównym tego powodem jest znacząca różnica między ekwiwalentem emisji CO<sub>2</sub> związanej z procesem produkcji ciepła: 92,0 kg·ha<sup>-1</sup> dla PtE oraz 1690 kg·ha<sup>-1</sup> dla PtS. Dzięki spalaniu biomasy (ścięte gałęzie w tym przypadku) emitowany dwutlenek węgla jest uważany za biogeny, a zatem neutralny dla klimatu. Z drugiej strony, w przypadku PtS, substytucja cieplna pochodząca ze spalania węgla prowadzi do znacznej bezpośredniej emisji CO<sub>2</sub>. Konsekwencją spalania gałęzi dla celów energetycznych (scenariusz PtE) była potrzeba użycia dodatkowych nawozów w celu pokrycia niedoboru składników odżywczych w glebie, w tym N, P i K. Chociaż prasa rolująca nie jest w stanie zebrać wszystkich gałęzi i część z nich nadal zostaje w sadzie, użycie dodatkowych nawozów skutkuje emisją na poziomie 50,2 kg ekwiwalentu CO<sub>2</sub>·ha<sup>-1</sup>. W scenariuszu PtS (gałęzie są rozdrabniane i nie są usuwane) w sadzie pozostaje więcej węgla organicznego, powodując niewielki efekt sekwestracji dzięki długoterminowej stabilności udziału wprowadzonego węgla. W rezultacie w scenariuszu PtS wartość ekwiwalentu CO<sub>2</sub> wynosi -5,93 kg·ha<sup>-1</sup>. Zatem, pomimo ujemnego wskaźnika CO<sub>2</sub> z tytułu pozostawienia gałęzi w sadzie w scenariuszu PtS, ogólny scenariusz PtE pokazuje znacznie niższy Potencjał Zmian Klimatu. Podobnie wskaźnik dotyczący emisji cząstek stałych (wpływ na układ oddechowy) spowodowany głównie przez emisję drobnego pyłu (PM<sub>2,5</sub>) w procesach produkcji ciepła jest zdecydowanie niższy dla scenariusza PtE (IE=4,39×10<sup>-2</sup>·ha<sup>-1</sup>), w porównaniu do scenariusza PtS (IE=3,18×10<sup>-1</sup>·ha<sup>-1</sup>). Wynika to przede wszystkim z procesu spalania i właściwości danego paliwa. Wśród analizowanych wskaźników środowiskowych, tylko Całkowity Potencjał Eutrofizacji był wyższy dla PtE (IE=1,57×10<sup>-1</sup>·ha<sup>-1</sup>), na który składała się głównie emisja amoniaku z tytułu stosowania sztucznych nawozów (IE=8,19×10<sup>-2</sup>·ha<sup>-1</sup>) oraz emisja NO<sub>x</sub> ze spalania zebranych bel kotle (IE=6,67×10<sup>-2</sup>·ha<sup>-1</sup>). Wpływ scenariusza PtS był niższy (IE=4,44×10<sup>-2</sup>·ha<sup>-1</sup>) i zdominowany przez emisję NO<sub>x</sub> ze spalania węgla kamiennego. Przeprowadziłem także analizę wrażliwości wpływu wielkości jednostki cieplnej oraz odległości sadu od miejsca spalania wyprodukowanych bel (6 km, 60 km, 600 km) na wskaźniki środowiskowe, ale nie odwróciły one jakościowo wyników końcowych, chociaż udział składowych wskaźników środowiskowych procesu transportu uległ wyraźnemu zwiększeniu.



#### 4.3.4. Wnioski

Biomasa jest podstawowym źródłem energii odnawialnej i efektywne wykorzystanie jej potencjału jest kluczowe w kontekście ograniczenia zużycia paliw kopalnych, redukcji emisji dwutlenku węgla do atmosfery i zrównoważonego rozwoju lokalnych rynków energii. Obecnie, jednym z niewykorzystanych zasobów biomasy odpadowej pochodzenia rolniczego są gałęzie z upraw trwałych powstające z regularnego przycinania drzew i krzewów, w tym sadów jabłoniowych. Powodem niskiego zainteresowania komercyjnym wykorzystaniem biomasy sadowniczej w celach energetycznych przez sadowników jest brak wystarczającej fachowej wiedzy i danych literaturowych dotyczących nie tylko jej potencjału, ale również nakładów energetycznych, kosztów technologii, korzyści ekonomicznych i środowiskowych, a także wpływu tego rozwiązania na rozwój rynku energii w regionie.

Analiza wyników pomiarów pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków końcowych:

- potencjał energetyczny ściętych gałęzi z sadów jabłoniowych jest znaczny, przy czym wyraźnie zróżnicowany, pozwala jednak lokalnie na istotne zwiększenie udziału energii odnawialnej w produkcji ciepła,
- bilans energii związany z użyciem prasy rolującej i energetycznym wykorzystaniem ściętych gałęzi z sadu jabłoniowego jest dodatni, przy czym na jego wartość wpływa wiele czynników, z których najważniejsze to: odpowiednie zarządzanie powstałym odpadem, ilość zebranych gałęzi, zastosowane technologie zbioru,
- właściwe przygotowanie sadu jabłoniowego pod kątem procesu zbioru gałęzi przez użycie prasy rolującej, czy zastosowaniu odpowiednich nagarniaczy przyczynia się do wzrostu ilości zbieranej biomasy sadowniczej, a tym samym do poprawy bilansu energetycznego zastosowanej technologii,
- bilans energii przy zastosowaniu pracy rolującej jest większy od systemu opartego o zbiór i rozdrabnianie zebranych gałęzi do postaci zrębki drzewnej, przy czym warunek ten może być spełniony tylko w przypadku dostępności na rynku lokalnym do kotła spalającego wyprodukowane bele,
- pod względem środowiskowym, użycie prasy rolującej i wykorzystanie ściętych gałęzi do produkcji ciepła przynosi zdecydowanie więcej korzyści, zwłaszcza w kontekście redukcji emisji dwutlenku węgla do atmosfery, w porównaniu do aktualnie stosowanego rozwiązania polegającego na bezpośrednim mulczowaniu gałęzi w sadzie,
- wykorzystanie ściętych gałęzi z sadu jabłoniowego w celach energetycznych może przynieść wymierne korzyści ekonomiczne, chociaż zależy to przede wszystkim od ilości zebranej biomasy sadowniczej, właściwej organizacji prac w sadzie, powierzchni sadów obsługiwanych przez prasę rolującą czy odległości sadu od miejsca jej docelowego spalania.

#### 4.3.5. Podsumowanie

Teoretyczny potencjał energetyczny gałęzi pozyskiwanych podczas zimowo-wiosennego przycinania drzew jabłoniowych w Polsce określono na  $12,5 \text{ PJ}\cdot\text{rok}^{-1}$  (**publikacja A**). Tylko w województwie mazowieckim, wartość potencjału sięga  $4,8 \text{ PJ}\cdot\text{rok}^{-1}$ . Biorąc pod uwagę potencjał ekonomiczny w Polsce ( $8,0 \text{ PJ}\cdot\text{rok}^{-1}$ ) wykazałem, że pozwala to ograniczyć ilość spalane go węgla w wysokości około  $310\,000 \text{ Mg}\cdot\text{rok}^{-1}$ . Wskazuje to jednoznacznie na



potencjał lokalny takiego źródła energii i możliwości aplikacyjne. W odniesieniu do potencjału biomasy odpadowej z przycinania gałęzi drzew jabłoniowych w Europie (**publikacja B**), potencjał teoretyczny wyniósł 29,11 PJ·rok<sup>-1</sup>. Na tle Europy, potencjał Polski stanowi ponad 30%. Innymi krajami o istotnym potencjale są Włochy, Rumunia, Francja i Niemcy o wartościach odpowiednio 3,38 PJ·rok<sup>-1</sup>, 3,32 PJ·rok<sup>-1</sup>, 2,38 PJ·rok<sup>-1</sup> i 2,05 PJ·rok<sup>-1</sup>. Uzyskane wyniki również potwierdzają, że biomasa odpadowa z sadów powinna być brana pod uwagę w zdecentralizowanych systemach grzewczych opartych o paliwa odnawialne. Najważniejszym aspektem, w kontekście pozyskiwania biomasy sadowniczej, jest uzyskany przede wszystkim dodatni bilans energii rozpatrywanej technologii wynikający z różnicy energii zawartej w zebranej biomasy odpadowej i energii włożonej do realizacji ciągu logistycznego „Gałęzie do Energii”. W **publikacji C** wyliczyłem bilans energii na EB=11,94 GJ·ha<sup>-1</sup>. W stosunku do aktualnego sposobu zagospodarowania gałęzi (rozdrabnianie i pozostawianie gałęzi w sadzie), dla którego bilans energii był ujemny (EB=-0,28 GJ·ha<sup>-1</sup>), jest to zdecydowana poprawa i podniesienie efektywności energetycznej. Ponadto, w porównaniu do technologii alternatywnej (zbiór gałęzi i wywóz zrębki drzewnej), dla której EB=5,24 GJ·ha<sup>-1</sup>, proponowana technologia balotowania z wykorzystaniem prasy rolującej charakteryzuje się około dwukrotnie wyższym dodatnim bilansem energii. Wyniki te pozytywnie weryfikują zatem Hipotezę 1.

W rozpatrywanym ciągu logistycznym energetycznego wykorzystania biomasy sadowniczej, najważniejszym czynnikiem poprawiającym końcowy bilans energii jest ilość pozyskanej biomasy przez prasę rolującą, nawet jeżeli związane jest to z wydłużeniem czasu pracy maszyny i wzrostem zużycia paliwa w wyniku jej większego obciążenia. W **publikacjach D i E** wykazałem, że energia zgromadzona w całkowitej ilości zebranej biomasy w porównaniu z wykorzystaną dodatkową energią zawartą w paliwie i smarach do zasilania ciągnika i prasy rolującej była większa, co potwierdził bardzo niski wskaźnik EIS, który był nieco powyżej 1% i wysoki wskaźnik EROI przekraczający wartość 80 (**publikacja D**). Zastosowanie dodatkowych nagarniaczy spowodowało spadek strat zbioru z ok. 40% do poziomu 20%, co poprawiło efektywność energetyczną i związany z tym bilans energii EB o dodatkowe 25% i więcej. Oprócz poprawy wskaźników energetycznych, istotnym jest również aspekt ekonomiczny zastosowanego rozwiązania. Wykazałem, że użycie nagarniaczy zwiększyło wydajność zbioru, ale spowodowało jednocześnie wzrost kosztów pracy prasy rolującej wynikający z wydłużenia czasu pracy niezbędnego do zebrania gałęzi z danej powierzchni sadu (SMH wzrósł o 21-28%). Po uwzględnieniu jednak przychodów ze sprzedaży większej ilości zebranej biomasy, końcowy efekt finansowy był korzystniejszy. Rozpatrywana technologia z użyciem prasy rolującej charakteryzuje się także niższymi kosztami (ok. 30%) w stosunku do procesu zbioru i zrębkowania gałęzi. Podobne korelacje uzyskano w **publikacji E**, gdzie badałem wpływ przygotowania sadu pod kątem zbioru gałęzi w celach energetycznych. W sadzie uprawianym w sposób tradycyjny straty w zbiorze gałęzi sięgały 70%, a koszty prac były wyższe niż przychody ze sprzedaży balotów. W sadzie ukierunkowanym na zbiór biomasy dla celów energetycznych, straty zbioru gałęzi wynosiły poniżej 20%, a sprzedaż balotów skutkowała dodatnim bilansem ekonomicznym. Pod względem efektywności energetycznej, w obu sadach uzyskano dodatni bilans energii, ale w sadzie tradycyjnym bilans energii EB (EB=7,66 GJ·ha<sup>-1</sup>) był prawie trzykrotnie niższy niż w sadzie ukierunkowanym na zbiór gałęzi (EB=20,74 GJ·ha<sup>-1</sup>). Potwierdził to także wskaźnik udziału energii włożonej do pozyskanej (EIS), który dla sadu tradycyjnego był prawie dwukrotnie wyższy (EIS=3,90%) od sadu ukierunkowanego na zbiór biomasy (EIS=2,05%).



Wyniki te podkreślają znaczenie potencjału zbioru gałęzi i ich wpływ na efektywność energetyczną oraz efekt ekonomiczny, co pozytywnie weryfikuje Hipotezę 2.

W analizie LCA (**publikacja F**) przeprowadzonej dla rozpatrywanego ciągu logistycznego opartego o zbiór gałęzi za pomocą prasy rolującej wykazałem, że Wskaźnik Potencjału Zmian Klimatu w scenariuszu „Gałęzie do Energii” (PtE) jest około 10 razy mniejszy niż dla scenariusza „Gałęzie do Gleby” (PtS), przy założeniu, że oba scenariusze uzyskują te same efekty końcowe polegające na uzyskaniu tej samej ilości ciepła użytecznego i wprowadzeniu tej samej ilości próchnicy do gleby. Dla scenariusza PtE wartość tego wskaźnika wyliczyłem na  $171 \text{ kgCO}_2 \text{ eq}\cdot\text{ha}^{-1}$ , a dla scenariusza PtS na  $1720 \text{ kgCO}_2 \text{ eq}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Różnice te wynikają przede wszystkim z ekwiwalentu emisji  $\text{CO}_2$  związanego z procesem produkcji ciepła. W pierwszym przypadku, w celu produkcji ciepła wykorzystywana jest biomasa w postaci gałęzi, której spalanie jest traktowane jako neutralne dla środowiska z punktu widzenia emisji  $\text{CO}_2$ . W drugim przypadku, do wytworzenia ciepła konieczne było spalanie paliwa kopalnego ( w tym przypadku węgla kamiennego, jako nadal dominującego paliwa grzewczego w gospodarstwach domowych). W efekcie, dla scenariusza „Gałęzie do Energii” (spalanie biomasy) wskaźnik emisji wyniósł tylko  $92,0 \text{ kgCO}_2 \text{ eq}\cdot\text{ha}^{-1}$ , podczas gdy dla scenariusza „Gałęzie do Gleby” wartość ta wyniosła aż  $1690 \text{ kgCO}_2 \text{ eq}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Pozostałe etapy ciągu logistycznego dla obu technologii nie wpływają już znacząco na bilans końcowy. Wskaźniki emisji podczas zbioru biomasy w sadzie (scenariusz PtE) oraz mulczowania biomasy (scenariusz PtS) są bardzo zbliżone (ok.  $25 \text{ kgCO}_2 \text{ eq}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Różnice występują w odniesieniu do kwestii źródła próchnicy i związaną z tym zagadnieniem emisją  $\text{CO}_2$  dla rozpatrywanych scenariuszy: wskaźnik dodatni dla PtE wynoszący  $50,2 \text{ kgCO}_2 \text{ eq}\cdot\text{ha}^{-1}$  oraz wskaźnik ujemny dla PtS w wysokości  $-5,9 \text{ kgCO}_2 \text{ eq}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Także wartość wskaźnika emisji związanego z lokalnym transportem w ramach scenariusza PtE jest niewielka (ok.  $2 \text{ kgCO}_2 \text{ eq}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Zatem, proponowany ciąg logistyczny wykorzystania gałęzi do celów energetycznych jest bardzo korzystny i przyczynia się do obniżenia emisji dwutlenku węgla do atmosfery, co wyjaśnia przyjętą Hipotezę 3.

#### 4.3.6. Wkład w rozwój dyscypliny inżynierii rolniczej

Przeprowadzone badania i uzyskane wyniki mają istotny wkład w rozwój dyscypliny inżynierii rolniczej, ponieważ dostarczają wiedzę w zakresie nakładów energetycznych zarówno poszczególnych etapów, jak i całego ciągu logistycznego zagospodarowania gałęzi z przycinania drzew jabłoniowych z użyciem prasy rolującej. Dodatkowo, pozwalają poprawić efektywność energetyczną przedsiębiorstw i gospodarstw sadowniczych zajmujących się produkcją jabłek umożliwiając jednocześnie zwiększenie przychodów gospodarstwa dzięki sprzedaży zebranej biomasy na rynku lokalnym w celach energetycznych. Wyniki analizy LCA również dostarczają nowej wiedzy w zakresie wpływu procesu energetycznego zagospodarowania biomasy odpadowej na środowisko naturalne. Z uwagi na możliwe korzyści środowiskowe jest to szczególnie istotne w inżynierii rolniczej, ponieważ procesy produkcyjne w rolnictwie w znacznym stopniu przyczyniają się do obciążenia środowiska naturalnego.

Uzyskana wiedza może zostać wykorzystana także do oceny potencjałów biomasy odpadowej (jako alternatywy dla paliw kopalnych) w ramach lokalnej polityki energetycznej, w której istotną rolę odgrywa rolnictwo i jego zasoby. W końcu, technologia zbioru gałęzi w sadach jabłoniowych, przedstawiona metodyka badawcza czy uzyskane wskaźniki energetyczne mogą być wykorzystane także przy analizie pozyskiwania biomasy odpadowej z



innych upraw stałych drzew owocowych i krzewów, a także przy ocenie wpływu tej technologii na środowisko naturalne.

Należy dodać, że przeprowadzone przeze mnie badania stwarzają przestrzeń także do dalszych prac naukowych i rozwoju dyscypliny inżynierii rolniczej w takich obszarach, jak: optymalizacja gospodarki odpadem sadowniczym, poprawa efektywności zbioru ściętych gałęzi w sadzie przy użyciu prasy rolującej (czy zrębkującej), logistyka biomasy odpadowej z upraw trwałych czy porównanie kompleksowej strategii „Gałęzie do Energii” z innymi łańcuchami logistycznymi innych źródeł energii wykorzystywanych lokalnie w małych i średnich układach grzewczych.

#### 4.3.5. Bibliografia

1. European Commission. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council—On the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources and Amending and Subsequently Repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC; European Commission: Brussels, Belgium, 2009.
2. European Commission. On Sustainability Requirements for the Use of Solid and Gaseous Biomass Sources in Electricity, Heating and Cooling—Report from the Commission to the Council and European Parliament; COM(2010)11; European Commission: Brussels, Belgium, 2010.
3. United Nations Environmental Programme (UNEP). Converting Waste Agricultural Biomass into a Resource. Compendium of Technologies; UNEP: Osaka/Shiga, Japan, 2009.
4. World Bioenergy Association. Global Biomass Potential Towards 2035; World Bioenergy Association: Stockholm, Sweden, 2016. Available online: [https://worldbioenergy.org/uploads/Factsheet\\_Biomass%20potential.pdf](https://worldbioenergy.org/uploads/Factsheet_Biomass%20potential.pdf) (accessed on 15 November 2018).
5. Baruya, P. World Forest and Agricultural Crop Residue Resources for Cofiring; IEA Clean Coal Centre: London, UK, 2015; ISBN: 978-92-9029-571-6.
6. Daioglou, V.; Stehfest, E.; Wicke, B.; Faaij, A.; van Vuuren, D.P. Projections of the availability and cost of residues from agriculture and forestry. *GCB Bioenergy* 2016, 8, 456–470.
7. European Commission. Innovating for Sustainable Growth—A Bioeconomy for Europe; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2012; ISBN 978-92-79-25376-8, doi:10.2777/6462.
8. EUROSTAT, (nrg\_110a), 2016. Available online: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_statistics\\_-\\_an\\_overview#Final\\_energy\\_consumption](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview#Final_energy_consumption) (accessed on 1 October 2018).
9. EEA Report, 2017. Annual European Union Greenhouse Gas Inventory 1990–2015 and Inventory Report 2017. Available online: <https://www.eea.europa.eu/publications/european-union-greenhouse-gas-inventory-2018> (accessed on 5 October 2018).
10. EUROSTAT, 2017: Energy, transport and environment indicators, 2017 Edition. Available online: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/8435375/KS-DK-17-001-FACTSHEETS.pdf> (accessed on 12 September 2018).
11. Asadullah, M. Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 29, 201–215, doi: 10.1016/j.rser.2013.08.074.
12. Sustainable and Optimal Use of Biomass for Energy in the EU Beyond 2020, Final Report. Available online: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/biosustain\\_report\\_final.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/biosustain_report_final.pdf) (accessed on 8 October 2018).
13. Mola-Yudego, B.; Arevalo, J.; Díaz-Yáñez, O.; Dimitriou, I.; Freshwater, E.; Haapala, A.; Khanam, T.; Mari, S. Reviewing wood biomass potentials for energy in Europe: the role of forests and fast growing plantations. *Biofuels* 2017, 8, 401–410, doi:10.1080/17597269.2016.1271627.
14. Kluts, I.N.; Brinkman, M.L.J.; de Jong, S.A.; Junginger, H.M. Biomass resources: Agriculture. *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.* 2017, doi: 10.1007/10\_2016\_66.
15. ARR [2014]: Rynek owoców w Polsce (The fruits market in Poland), Agencja Rynku Rolnego, Listopad 2014, Warszawa. [accessed 16.02.2015]. Available from: [www.arr.gov.pl](http://www.arr.gov.pl).
16. Mika A. [2012]: Cięcie drzew w sadach intensywnych (Trimming of trees in intensive orchards), Hortpress, Warszawa.



17. Badowska-Czubik T., Bielicki P., Bryk H., Buczek M., Cieślińska M., Kołtowski Z., Kruczyńska D., Lisek J., Meszka B., Morgaś H., Rabcewicz J., Rutkowski K., Sekrecka M., Sobiczewski P. J., Treder W., Wawrzyniak A., Wójcik P. [2012]: Jabłonie (Apple trees), Hortpress, Warszawa.
18. Sanford Martin R., Schultz Ch. [2013]: How to prune fruit trees, Echo Point Books & Media, September 2013.
19. Niederholzer F.J., Krueger W.H., Buchner R.P., Klonsky K.M., De Moura R.L. [2007]: Sample costs to establish a prune orchard and produce prunes, University of California Cooperative Extension, Sacramento Valley – 2007.
20. Kadiata B.D., Mulongoy K and Isirimah N.O. [1998]: Effect of tree pruning and pruning application to trees on nitrogen fixation by *Leucaena* and *Gliricidia*. *Agroforestry Systems* 39: 117-128.
21. Cowie A, Smith P., Johnson D. [2006]: Does soil carbon loss in biomass production systems negate the greenhouse benefits from bioenergy? *Mitigation Adapt Start Global Change* 11: 979-1002.
22. Gabrielle B., Gagnaire N. [2008]: Life-cycle assessment of straw use in bio-ethanol production: a case study based on biophysical modelling. *Biomass and Bioenergy* 32: 431-441.
23. Ritchie D.F., Sutton T.B., Walgenbach J.F. [2012]: Disease and insect management in the home orchard, The University of North Carolina, North Carolina Plant Disease and Insect Clinic, October 2012.
24. Duca D., Toscano G., Pizzi A., Rossini G., Fabrizi S., Lucesoli G., Servili A., Mancini V., Romanazzi G., Mengarelli Ch. [2016]: Evaluation of the characteristics of vineyard pruning residues for energy applications: effect of different copper-based treatments, *Journal of Agricultural Engineering* 47 [1]: 22-27.
25. Silvestri S., Cristoforetti A., Mescalchin E., Spinelli R. [2011]: Recovery of pruning waste for energy use - agronomic, economic and ecological aspects, *Proceedings of: Central European, Biomass Conference 2011, 26-29 January, Graz, Austria*.
26. Dyjakon A., Den Boer J., Bukowski P. [2014]: Europruning: A new direction for energy production from biomass. *Agricultural Engineering* 151 [3]: 163-174.
27. Cotana F., Cavalaglio G., Rinaldi S. [2009]: Energy and environmental performance of a polygeneration plant from vineyard pruning residues. *Proceedings of: 17th European Biomass Conference & Exhibition, 29 June - 2 July 2009, Hamburg, Germany*.
28. Pari, L., Suardi, A., Scarfone, A., Acampora, A., Frackowiak, P., Adamczyk, F., Santangelo, E. Harvesting of almond (*Prunus dulcis*, Mill.) pruning in Spain using a new chipper prototype. In *Proceeding of the 24th European Biomass Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, 6-9 June 2016*.
29. Frackowiak, P.; Adamczyk, F.; Wąchalski, G.; Szaroleta, M.; Dyjakon, A.; Pari, L.; Suardi, A. A prototype machine for harvesting and baling of pruning residues in orchards: First test on apple orchard (*MALUS MILL.*) in Poland. *J. Res. Appl. Agric. Eng.* 2016, 61, 88-93.
30. Bosona, T.; Gebresenbet, G. Evaluating Logistics Performances of agricultural prunings for energy production: A logistics audit analysis approach. *Logistics* 2018, 2, 19, doi:10.3390/logistics2030019.
31. Akhtari, S.; Sowlati, T.; Day, K. Optimal flow of regional forest biomass to a district heating system. *Int. J. Energy Res.* 2014, 38, 954-964, doi:10.1002/er.3099.
32. Pari, L.; Suardi, A.; Santangelo, E.; García-Galindo, D.; Scarfone, A.; Alfano, V. Current and innovative technologies for pruning harvesting: A review. *Biomass Bioenergy* 2017, 107, 398-410, doi:10.1016/j.biombioe.2017.09.014.
33. Magagnotti, N.; Pari, L.; Picchi, G.; Spinelli, R. Technology alternatives for tapping the pruning residue resource. *Bioresour. Technol.* 2013, 128, 697-702.
34. Picchi, G.; Silvestri, S.; Cristoforetti, A. Vineyard residues as a fuel for domestic boilers in Trento Province (Italy): Comparison to wood chips and means of polluting emissions control. *Fuel* 2013, 113, 43-49.
35. Velazquez-Marti, B.; Fernandez-Gonzales, E.; Callejon-Ferre, A.J.; Estornell-Cremades, J. Mechanized methods for harvesting residual biomass from Mediterranean fruit tree cultivations. *Sci. Agricola* 2012, 69, 180-188.
36. Spinelli, R.; Nati, C.; Pari, L.; Mescalchin, E.; Magagnotti, N. Production and quality of biomass fuels from mechanized collection and processing of vineyard pruning residues. *Appl. Energy* 2012, 89, 374-379.
37. Spinelli, R.; Picchi, G. Industrial harvesting of olive tree pruning residue for energy biomass. *Bioresour. Technol.* 2010, 101, 730-735.
38. Spinelli, R.; Magagnotti, N.; Nati, C. Harvesting vineyard pruning residues for energy use. *Biosyst. Eng.* 2010, 105, 316-322.
39. Andrea, M.C.S.; Tieppo, R.C.; Gimenez, L.M.; Povh, F.P.; Katsman, T.J.; Romanelli, T.L. Energy demand in agricultural biomass production in Parana state, Brazil. *Agric. Eng. Int.* 2014, 2014, 42-51.



40. Singh, M.K.; Pal, S.K.; Thakur, R.; Verma, U.N. Energy input–output relationship of cropping systems. *Indian J. Agr. Sci.* 1997, 67, 262–264.
41. Mandal, K.G.; Saha, K.P.; Ghosh, P.K.; Hati, K.M.; Bandyopadhyay, K.K. Bioenergy and economic analysis of soybean-based crop production system in central India. *Biomass Bioenergy* 2002, 23, 337–345.
42. Hussain, Z.; Khan, M.A.; Irfan, M. Water energy and economic analysis of wheat production under raised bed and conventional irrigation systems: A case study from a semi-arid area of Pakistan. *Soil Tillage Res.* 2010, 109, 61–67, doi:10.1016/j.still.2010.04.007.
43. Nati, C.; Boschiero, M.; Picchi, G.; Mastrolonardo, G.; Kelderer, M.; Zerbe, S. Energy performance of a new biomass harvester for recovery of orchard wood wastes as alternative to mulching. *Renew. Energy* 2018, 124, 121–128.
44. Perea-Moreno, A.-J.; Perea-Moreno, M.-A.; Pilar Dorado, M.; Manzano-Agugliaro, F. Mango stone properties as biofuel and its potential for reducing CO2 emissions. *J. Clean. Prod.* 2018, 190, 53–62.
45. KOBiZE (The National Centre for Emissions Management). *Calorific Values and CO2 Emission Factors in 2015 for Reporting within Emission Trading System (ETS) for 2018*; KOBiZE: Warsaw, Poland, 2017.
46. Spinelli, R.; Lombardini, C.; Pari, L.; Sadauskiene, L. An alternative to field burning of pruning residues in mountain vineyards. *Ecol. Eng.* 2014, 70, 212–216, doi:10.1016/j.ecoleng.2014.05.023.
47. Adamczyk, F.; Dyjakon, A.; Frąckowiak, P.; Romański, L. Conception of machine for pressing branches with pruning fruit tree. *J. Res. Appl. Agr. Eng.* 2014, 59, 5–9.
48. Mathanker, S.K.; Hansen, A.C. Impact of miscanthus yield on harvesting cost and fuel consumption. *Biomass Bioenergy* 2015, 81, 162–166, doi:10.1016/j.biombioe.2015.06.024.
49. Central Statistical Office in Poland (GUS). *Energy Consumption in Households in 2015*. Warsaw 2017 (ISSN 2084-8137). Available online: <http://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/zuzycie-energii-w-gospodarstwach-domowych-w-2015-r,-2,3.html> (accessed on 10 February 2019).



## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych (wykaz publikacji przedstawiony w załączniku 3)

Moja praca naukowo-badawcza zarówno w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej, jak i w Instytucie Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu od początku była związana z procesami cieplnymi i energetycznymi związanymi z pozyskiwaniem, wytwarzaniem i wykorzystaniem energii pochodzącej z paliw kopalnych oraz odnawialnych źródeł energii, zwłaszcza biomasy. Zdobyte duże doświadczenie praktyczne w tym obszarze, dzięki zaangażowaniu w wiele projektów realizowanych dla przemysłu oraz realizacji badań na obiektach energetycznych czy w obszarach rolniczych, w których powstają odpady o potencjale energetycznym umożliwiło mi podjęcie także szerokiej współpracy z innymi ośrodkami/zespołami badawczymi. W związku z tym, w mojej dotychczasowej pracy naukowej można wyodrębnić dwa główne obszary tematyczne badań:

- a) problematyka zapłonu, stabilności płomienia oraz spalania paliw kopalnych w obiektach energetycznych,
- b) właściwości biomasy i jej wykorzystanie dla celów energetycznych.

Zapłon i stabilność płomienia pyłowego za pomocą plazmy oraz możliwość rozruchu kotłów pyłowych bez wykorzystania innych paliw podtrzymujących proces spalania pyłu węglowego były przedmiotem wielu moich badań realizowanych zarówno w ramach grantu KBN młodego badacza (załącznik 3, poz. 2.11.1), grantu promotorskiego (załącznik 3, poz. 2.11.2), jak i w okresie po uzyskaniu stopnia naukowego doktora (załącznik 3, poz. 2.2.1-2.2.4, 2.2.6, 2.2.11, 2.6.1-2.6.5, 2.6.7, 2.6.10, 2.6.11, 2.7.1-2.7.3). W pracach tych wykazałem stabilność zapłonu i spalania pyłu węglowego w szerokim zakresie współczynnika nadmiaru powietrza i przy różnym stopniu rozdrobnienia paliwa stałego, a efekt stabilności płomienia udowodniłem za pomocą modelu matematycznego. Efektem dodatkowym było uzyskanie dwóch patentów dotyczących sposobu uruchamiania palników plazmowych (załącznik 3, poz. 2.5.2, 2.5.3), które mogą być wykorzystane w energetyce zawodowej do rozruchu kotłów pyłowych z zastosowaniem tylko paliwa podstawowego (węgla). Kontynuacją tej problematyki były szerokie badania nad poprawą zapłonu rozpylonych paliw ciekłych, także przy wykorzystaniu plazmy, które były realizowane w ramach grantu własnego KBN (załącznik 3, poz. 2.11.3), którego byłem kierownikiem. Badania wykazały wzrost zakresu stabilnego zapłonu paliw ciekłych przy wykorzystaniu plazmy, szczególnie dla wyższych współczynników nadmiaru powietrza i niższych ciśnień rozpylania paliwa (załącznik 3, poz. 2.1.1, 2.2.9, 2.6.8, 2.6.9, 2.7.3). W tym przypadku również uzyskałem patent za urządzenie do zapłonu rozpylonych paliw ciekłych (załącznik 3, poz. 2.5.1). W tym okresie prowadziłem także badania i ekspertyzy w zakresie spalania węgla, czego efektem były również publikacje, skrypty i raporty (załącznik 3, poz. 2.1.2, 2.2.5, 2.2.14, 2.2.32, 2.4.2, 2.4.3, 2.7.4, 2.7.6-2.7.10)

Wzrost zainteresowania spalaniem paliw biomasowych w energetyce zawodowej spowodował także moją aktywność naukową w tym zakresie. Badania właściwości fizykochemicznych biomasy i jej wpływ na korozję, procesy szlakowania i żużlowania powierzchni ogrzewalnych kotłów były szeroko badane nie tylko w skali laboratoryjnej, ale również w skali przemysłowej, czego odzwierciedleniem były liczne publikacje (załącznik 3, poz. 2.1.3, 2.2.8, 2.2.10, 2.2.12, 2.2.13, 2.2.15-2.2.19, 2.2.33, 2.3.12, 2.3.18, 2.4.1, 2.6.7, 2.6.12-2.6.15) i wystąpienia na dedykowanych konferencjach krajowych i zagranicznych. Badałem między innymi wpływ współspalania biomasy z węglem na procesy korozyjne z zastosowaniem SEM i



EDS. Badania te wykonywałem podczas stażu badawczego w laboratorium EDF we Francji. Zagadnienia te były realizowane także w ramach projektu finansowanego przez Holenderską Agencję Energii i Środowiska (załącznik 3, poz. **2.11.6**) dotyczącego współspalania biomasy z węglem w energetyce zawodowej, którego byłem wykonawcą podczas 3-letniego stażu zagranicznego na Uniwersytecie Technicznym Delft oraz ośrodka badawczym Energy Research Centre of the Netherlands (ECN) w Holandii. Przeprowadzone badania wykazały wpływ rodzaju biomasy na ich skłonność do szlakowania i intensyfikację tworzenia osadów na powierzchniach wymiany ciepła. W celu umożliwienia kontroli tych procesów w kotłach energetycznych, opracowałem mobilny układ do pomiaru tego zjawiska oparty o pomiar strumienia przenoszonego ciepła wraz z opracowaniem równania matematycznego do oceny intensywności procesu (załącznik 3, poz. **2.7.11**).

Konieczność ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery oraz zwiększenia udziału energii odnawialnej w krajowej produkcji energii były argumentami do dalszego prowadzenia badań w zakresie biomasy odpadowej pochodzenia rolniczego oraz ich potencjału energetycznego. Efektem mojej współpracy z zagranicznymi ośrodkami badawczymi była realizacja projektu europejskiego FP7 Europruning – numer 312078 (załącznik 3, poz. **2.11.7**) finansowanego przez Komisję Europejską oraz grant MNiSW (załącznik 3, poz. **2.11.8**), które dotyczyły realizacji nowego łańcucha logistycznego ukierunkowanego na wykorzystanie biomasy odpadowej w postaci gałęzi z przycinania plantacji różnego rodzaju drzew owocowych w celach energetycznych. W wyniku realizacji tych projektów (poza publikacjami wymienionymi w cyklu) powstało także wiele innych publikacji (załącznik 3, poz. **2.1.4, 2.1.6, 2.2.22-2.2.27, 2.2.34, 2.2.35, 2.3.4, 2.3.9, 2.3.22, 2.3.23**). Jako partner konsorcjum z Polski byłem kierownikiem tych projektów na Uczelni, a w samym projekcie byłem odpowiedzialny za jeden z głównych etapów (WP8) dotyczący aspektów środowiskowych, ekonomicznych i społecznych energetycznego wykorzystania tej formy biomasy odpadowej. W trakcie realizacji projektu określiłem między innymi potencjał teoretyczny, techniczny, ekonomiczny oraz zrównoważony biomasy sadowniczej w krajach UE, który może być wykorzystany do produkcji energii (ciepła czy energii elektrycznej). Efektem projektu było również uzyskanie patentu dotyczącego maszyny do zbierania ściętych gałęzi w sadach (załącznik 3, poz. **2.5.4**). Oprócz aspektów energetycznych, badałem także konsekwencje takiego kierunku zagospodarowania biomasy odpadowej dla środowiska naturalnego w oparciu o analizę LCA and LCCA. Wykazałem, że w określonych warunkach zarówno w kontekście środowiskowym, jak i ekonomicznym wskazany jest zbiór biomasy odpadowej celem jej spalania i produkcji energii, w porównaniu do rozdrabniania biomasy i pozostawieniu jej w sadzie, jako źródła próchnicy i materii organicznej.

Odbyte staże zagraniczne oraz współpraca z zagranicznymi ośrodkami naukowymi (załącznik 3, poz. **3.10**) sprawiły, że w moim dorobku naukowym znajdują się również wspólne publikacje (załącznik 3, poz. **2.1.3, 2.1.4, 2.1.6, 2.2.12, 2.2.13, 2.2.17, 2.2.19, 2.2.27, 2.2.34-2.2.36, 2.6.12-2.6.15**).

Pozostała aktywność naukowa także dotyczy zagadnień energetycznych i jest związana z moją pracą dydaktyczną na kierunku Odnawialne Źródła Energii i Gospodarka Odpadami. Stąd, w moim dorobku naukowym znajdują się również publikacje związane także z innymi odnawialnymi źródłami energii (załącznik 3, poz. **2.1.6, 2.2.5, 2.2.25, 2.2.26, 2.2.34-2.2.38, 2.3.1, 2.3.3, 2.3.5-2.3.8, 2.3.10, 2.3.11, 2.3.13-2.3.17, 2.3.19, 2.3.20, 2.3.21, 2.3.24-2.3.27, 2.6.1, 2.6.2, 2.6.3**).

Wyniki opisanych wyżej badań oraz pozostałej działalności naukowej zaprezentowałem wygłaszając osobiście 50 referatów na konferencjach krajowych i międzynarodowych.



Jestem współautorem 4 skryptów/podręczników akademickich, 4 patentów oraz kilkunastu opracowań i raportów dla przemysłu. Szczegółowe dane działalności naukowej przedstawiono w załączniku 3.

## 6. Działalność organizacyjna i dydaktyczna

W ramach pracy na Uczelni, jestem poważnie zaangażowany w jej działalność organizacyjną, dydaktyczną oraz popularyzatorską nauki.

Obecnie, w zakresie działalności organizacyjnej, pełnię funkcję Koordynatora ds. ECTS na kierunku studiów Zarządzanie i Inżynieria Produkcji (ZiIP) na Wydziale Przyrodniczo-Technologicznym Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (od 2016) oraz Koordynatora ds. USOS na kierunku studiów Zarządzanie i Inżynieria Produkcji (ZiIP) na Wydziale Przyrodniczo-Technologicznym Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (od 2017). Jestem także Członkiem Komisji Kierunkowej ds. zapewnienia jakości kształcenia dla kierunku ZiIP na poziomie I (wchodzącej w skład USZJK) (od 2017). Regularnie biorę także udział w różnorodnych warsztatach i działaniach promocyjnych Uczelni organizowanych dla uczniów szkół podstawowych, gimnazjalnych i ponadgimnazjalnych.

W latach wcześniejszych byłem także Kierownikiem studiów podyplomowych Odnawialne Źródła Energii i Gospodarka Odpadami na Wydziale Przyrodniczo-Technologicznym Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (lata 2013-2018). Za uruchomienie oraz kierowanie studiami podyplomowymi „Odnawialne Źródła Energii i Gospodarka Odpadami” na Wydziale Przyrodniczo-Technologicznym Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu otrzymałem Nagrodę Rektora UPWr (2014). Byłem także Sekretarzem Komisji Rekrutacyjnej na kierunku Odnawialne Źródła Energii i Gospodarka Odpadami (OZEiGO) na Wydziale Przyrodniczo-Technologicznym Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (lata 2012-2017).

W odniesieniu do pracy dydaktycznej, prowadzę obecnie przede wszystkim wykłady, ćwiczenia, projekty i laboratoria na studiach I i II stopnia na kierunku Odnawialne Źródła Energii i Gospodarka Odpadami.

Na Wydziale Przyrodniczo-Technologicznym Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu prowadziłem również zajęcia na takich kierunkach, jak: Zarządzanie i Inżynieria Produkcji, Technika Rolnicza i Leśna, Rolnictwo czy Ochrona Środowiska.

Z kolei, na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej (w latach 1999-2010) prowadziłem zajęcia na specjalności Termoenenergetyka oraz Lotnictwo.

Opracowałem programy nauczania dla przedmiotów: Procesy wykorzystania biomasy, Technical biomass utilisation (dla studentów zagranicznych), Inteligentne budynki niskoemisyjne, Rekuperacja i magazynowanie energii, Regionalna polityka energetyczna, Techniczna przeróbka biomasy, Energetyka wiatrowa, Spalanie w Napędach Lotniczych (Politechnika Wroclawska).

Zaprojektowałem i wykonałem wiele stanowisk laboratoryjnych na potrzeby Laboratorium Odnawialnych Źródeł Energii oraz Laboratorium Biomasy i Odpadów, którego jestem Kierownikiem. Za działalność organizacyjną, w szczególności za rozwój laboratorium Odnawialnych Źródeł Energii, otrzymałem Nagrodę Rektora Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (2012).

Jestem współautorem skryptu „Energia z biomasy” dla studentów Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, za co otrzymałem nagrodę zespołową Rektora UPWr (2014).



a także skryptu „Odnawialne Źródła Energii – Przewodnik do ćwiczeń” oraz skryptu „Spalanie i Paliwa”.

Od 2011 roku jestem także opiekunem naukowym Studenckiego Koła Naukowego „BioEnergia” przy Wydziale Przyrodniczo-Technologicznym Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Za pracę na rzecz SKN na Wydziale P-T również otrzymałem Nagrodę Rektora UPWr (2017). Także w 2018 roku, za aktywną działalność dydaktyczno-wychowawczą w studenckim ruchu naukowym, otrzymałem Nagrodę Rektora UPWr.

W ramach popularyzacji nauki prowadziłem i prowadzę liczne warsztaty dla dzieci i młodzieży szkolnej w takich programach i projektach, jak: Uniwersytet Dzieci, Uniwersytet Młodego Odkrywcy, Szkoła w mieście, Dolnośląski Festiwal Nauki,

Szczegóły działalności organizacyjnej i dydaktycznej zostały przedstawione w załączniku 3.



## 7. Podsumowanie dorobku naukowego

Numer ORCID: 0000-0003-3618-2099

Researcher ID: D-4312-2019

Tabela 2. Zestawienie dorobku naukowego (publikacji)

Zestawienie publikacji L.p.	Nazwa czasopisma	Liczba Publikacji/ patentów	Punkty MNiSW w roku wydania (łącznie) <sup>a</sup>	IF według roku wydania <sup>b</sup>
<b>Osiągnięcie naukowe</b>				
1	Wood	1	15	0,642
2	Book: Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation	1	15	-
3	Energies	3	75	8,028
4	Sustainability	1	20	2,075
<b>Podsumowanie</b>		<b>6</b>	<b>125</b>	<b>10,745</b>
<b>Pozostałe prace (przed doktoratem)</b>				
1	Czasopisma z JCR	-	-	-
2	Czasopisma z poza JCR	6	32	-
3	Publikacje w materiałach konferencyjnych	4	6	-
4	Rozdział w monografii	-	-	-
5	Patenty	1	-	-
<b>Podsumowanie</b>		<b>11</b>	<b>38</b>	<b>0,000</b>
<b>Pozostałe prace (po doktoracie)</b>				
1	Czasopisma z JCR	6	130	6,23
2	Czasopisma z poza JCR	30	179	-
3	Publikacje w materiałach konferencyjnych	14	29	-
4	Rozdział w monografii	27	135	-
5	Patenty	3	130	-
<b>Podsumowanie</b>		<b>80</b>	<b>603</b>	<b>6,23</b>
<b>Podsumowanie</b>		<b>97</b>	<b>766</b>	<b>16,975</b>

<sup>a</sup> IF w roku wydania publikacji, w przypadku publikacji z roku 2018 i 2019 podano ostatni dostępny IF

<sup>b</sup> Punktacja MNiSW określona według roku wydania publikacji, w przypadku publikacji z roku 2018 i 2019 przyjęto aktualną punktację z listy z dnia 31 grudnia 2016

### Liczba cytowań publikacji:

- według bazy Web of Science (WoS): 19, bez autocytoowań: 5

- według bazy Scopus: 36: bez autocytoowań: 15

### Indeks Hirscha:

- według bazy Web of Science (WoS): 3

- według bazy Scopus: 4

