



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie
Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki

PRODUKCJA BIOPALIW – PROBLEMY WYBRANE

Jarosław Frączek, Bogusław Cieślikowski, Maciej Kuboń,
Krzysztof Mudryk, Jakub Sikora, Anna Szeląg-Sikora,
Grzegorz Wcisło, Marek Wróbel

Kraków 2014

Patronat naukowy: Komitet Techniki Rolniczej PAN

Recenzenci:

Prof. dr hab. Andrzej Ambrozik – Politechnika Świętokrzyska

Prof. dr hab. Józef Szlachta – UP Wrocław

Monografia wykonana w ramach projektu „Wzmocnienie potencjału dydaktycznego Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie”. Projekt realizowany w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, Priorytet IV „Szkolnictwo wyższe i nauka”, Działanie 4.3. „Wzmocnienie potencjału dydaktycznego uczelni w obszarach kluczowych w kontekście celów Strategii Europa 2020”.

Nr umowy: UDA-POKL.04.03.00-00-00-165/12-00

Redakcja naukowa:

Prof. dr hab. Jarosław Frączek

Opracowanie redakcyjne:

Dr hab. inż. Maciej Kuboń

Projekt okładki: dr inż. Marek Wróbel

Wydawca

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej w Krakowie (2014)

ISBN 978-83-64377-04-4

Druk i oprawa:

DRUKROL, Kraków, ul. Ujastek 9

tel./fax (12) 412 46 50

e-mail: drukarnia@drukrol.pl

<http://www.drukrol.pl>

Ark. wyd. 10,5; ark. druk. 9,5

Nakład: 150 egz.

SPIS TREŚCI

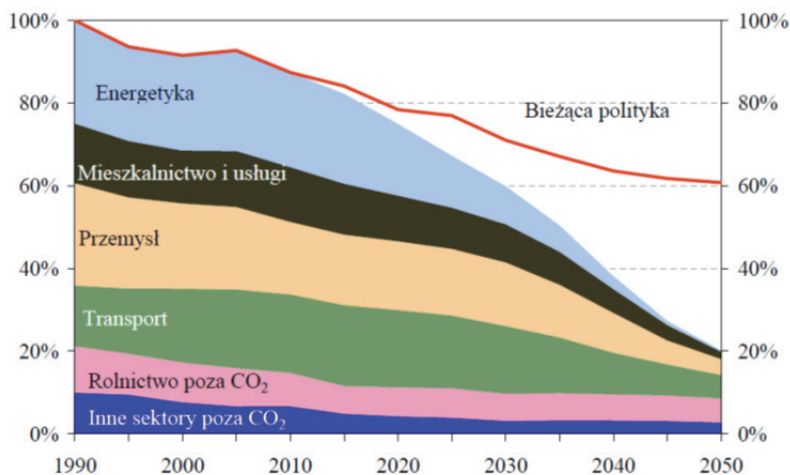
1.	Polityka proekologiczna UE i Polski	5
2.	Uwarunkowania formalno-prawne produkcji energii odnawialnej przez producentów rolnych – prosumentów	13
2.1.	Charakterystyka możliwości wykorzystania energii odnawialnej w gospodarstwach rolnych.....	13
2.2.	Uwarunkowania regulacyjno-prawne dedykowane dla energetyki rozproszonej i rozwiązań prosumenckich	15
2.3.	Obowiązek koncesyjny lub rejestracyjny oraz skutki ich braku	18
2.4.	Szanse i zagrożenia wynikające ze stosowania odnawialnych źródeł energii w gospodarstwach rolnych	19
3.	Technologie wytwarzania biogazu z monosubstratów	23
4.	Fermentacja metanowa.....	27
4.1.	Czynniki wpływające na przebieg fermentacji metanowej	27
4.2.	Surowce wykorzystywane w biogazowniach rolniczych	30
4.3.	Jakość i ilość biogazu uzyskiwanego w procesie fermentacji.....	35
5.	Pozyskanie biomasy	43
5.1.	Biomasa z terenów rolniczych	43
5.2.	Rośliny drzewiaste	45
5.3.	Rośliny jednoroczne - trawy i byliny	49
5.4.	Zbiór biomasy	60
6.	Uwarunkowania technologiczne i techniczne dostaw biomasy.....	75
6.1.	Rozwój produkcji biomasy	75
6.2.	Technologia zbioru, a technika i technologia prac transportowych ..	77
6.3.	Magazynowanie biomasy	92
6.4.	Dostawy biomasy na potrzeby energetyki konwencjonalnej	95
7.	Wpływ zróżnicowania genetycznego odmian rzepaku na wybrane własności fizyko-chemiczne biopaliw RME	103
7.1.	Europejskie normy dotyczące spalin.....	103
7.2.	Możliwości produkcji biopaliw ciekłych w Polsce.....	105
7.3.	Charakterystyka procesu produkcji biopaliw typu RME	106
7.4.	Podstawy teoretyczne obliczeń procesu transestryfikacji olejów roślinnych i/lub tłuszczów do FAME.....	108
7.5.	Określenie ciepła spalania i wartości opałowej biopaliw typu Biodiesel RME.....	110
7.6.	Ocena biopaliw RME ze względu na układ estrów kwasów tłuszczowych	113
7.7.	Określenie składu frakcyjnego biopaliw RME i oleju napędowego	116
7.8.	Określenie liczby cetanowej biopaliw typu Biodiesel RME oraz obliczenie indeksu cetanowego	120
7.9.	Ocena wpływu temperatury na własności reologiczne Biodiesli RME oraz oleju napędowego	122

8.	Kształtowanie cech fizycznych i chemicznych biopaliw RME w aspekcie doboru odmian rzepaku i eksploatacji pojazdów rolniczych.....	127
8.1.	Materiał i metody badawcze	127
8.2.	Zmienność cech biopaliw RME	130
8.3.	Badania laboratoryjne elastomerów	133
8.4.	Oznaczenie wybranych właściwości badanych elastomerów	134
8.5.	Wyniki i dyskusja.....	135
8.6.	Proces destrukcji materiałów konstrukcyjnych silnika	139
9.	Literatura.....	143

1. POLITYKA PROEKOLOGICZNA UE I POLSKI

W ostatnich latach daje się zaobserwować dynamiczny wzrost zużycia energii w skali światowej. Jego źródłem jest postęp techniczny indukujący podniesienie stopy życiowej oraz stopnia wykorzystania różnych maszyn i urządzeń przez przeciętnego mieszkańca Ziemi. W świetle wielu prognoz konwencjonalne źródła energii – na których oparta jest przede wszystkim produkcja energii elektrycznej i ciepła – ulegną szybkiemu wyczerpaniu (Postrzednik, 2010). Dodatkowym problemem jest emisja gazów cieplarnianych wywołująca zmiany klimatyczne na Ziemi. Z tych względów coraz istotniejszym problemem staje się możliwość efektywnego zagospodarowania energii pochodzących ze źródeł odnawialnych.

Sprzyja temu polityka proekologiczna UE. W lutym 2011 r. Komisja Europejska potwierdziła dążenie do ograniczenia wzrostu średniej temperatury na świecie do poziomu poniżej 2°C (KOM(2011) 112). Ma to zostać osiągnięte poprzez ograniczenie wewnętrznych emisji CO₂ do 2050 r. o 80% (w porównaniu z ich poziomem w 1990 r.) Długoterminową prognozę zmniejszenia emisji zamieszczono na rys.1.1.



Źródło: KOM, 2011

Rysunek 1.1. Przebieg ograniczania wewnętrznych emisji gazów cieplarnianych w UE

Jak wskazuje powyższa prognoza, główną rolę w gospodarce niskoemisyjnej będzie odgrywać energia elektryczna – w tym sektorze powinno dojść niemal do wyeliminowania emisji CO₂ do 2050 r. Realizacja tego zamierzenia jest możliwa jedynie przy wsparciu przez odpowiednie bodźce finansowe.

Równie ważnym, od strony energetycznej, sektorem gospodarki, jest mieszkalnictwo. Działania prowadzone w kierunku znacznej redukcji emisji CO₂ będą dotyczyły (Frączek i in., 2012):

- nowych budynków – powinny być projektowane jako inteligentne budynki o niemal zerowym zużyciu energii konwencjonalnej. Szacuje się, że dodatkowe koszty inwestycyjne powinny być pokrywane przez oszczędności paliwowe.
- budynków istniejących – powinny być doinwestowane „energetycznie” zarówno w kierunku niskoemisyjnej energii elektrycznej (docieplenie, pompy ciepła, grzejniki akumulacyjne itp.), jak i wykorzystania źródeł odnawialnych (energia słoneczna, biogaz, biomasa). Z przeprowadzonych prognoz wynika, że w ciągu najbliższych dziesięciu lat konieczne będzie zwiększenie inwestycji w energooszczędne komponenty i wyposażenie budynków nawet o 200 mld EUR. Niezbędne będzie więc wdrożenie elastycznych systemów finansowania, takich jak preferencyjne stopy procentowe.

Biorąc pod uwagę powyższe ukierunkowania należy stwierdzić, że spalanie biomasy w sektorze energetyki zawodowej i poprzez indywidualnych użytkowników powinno w najbliższym czasie być wyraźnie wspierane poprzez rządy krajów członkowskich UE.

Wprowadzane przez Unię coraz ostrzejsze normy dotyczące ochrony środowiska są dodatkowym czynnikiem determinującym zmiany struktury zużycia paliw pierwotnych i OZE. W roku 2008 Parlament Europejski przegłosował pakiet ustaw, nazywanych pakietem klimatycznym ("pakiet 3x20%"), zgodnie z którym, do 2020 roku państwa unijne będą zmuszone do:

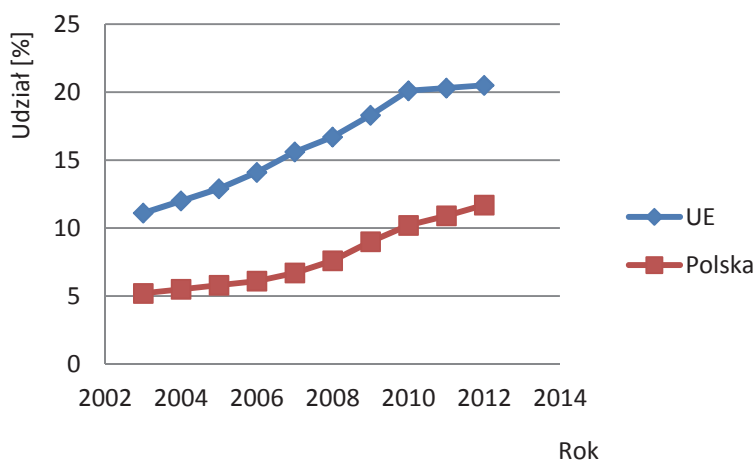
- ograniczenia emisji CO₂ o 20% w stosunku do roku 1990,
- zmniejszenia zużycia energii o 20% w stosunku do roku 1990,
- wzrostu udziału energii produkowanej z odnawialnych źródeł energii do 20%.

Dodatkowo zarekomendowano zwiększenie do 10% udziału biopaliw w ogólnym zużyciu paliw w transporcie na terenie unijnym. Realizacja tego celu spowoduje zmniejszenie wykorzystania wysokoemisyjnego węgla na rzecz odnawialnych źródeł energii oraz zmniejszenie energochłonności funkcjonujących systemów technicznych.

W warunkach Polski wprowadzenie w życie wspomnianego pakietu ustaw może być znacznie utrudnione, ze względu na konieczność kosztownej przebudowy sektora energetycznego, który w przeważającej większości wykorzystuje węgiel kamienny i brunatny (dla porównania - we Francji energetyka jest oparta w 85% na elektrowniach atomowych). Z tych względów, w krajowych prognozach przewidywany jest niższy – 15% wzrost udziału energii ze źródeł odnawialnych. Mimo tego stanowi to duże wyzwanie dla polskiej gospodarki, gdyż w roku 2014 zużycie energii z OZE osiągnęło poziom 13%, a zatem w ciągu dziesięciu lat nastąpił wzrost o ok. 8% (rys.1.2).

Zmiana struktury surowcowej produkcji energii elektrycznej i ciepła w kierunku większego wykorzystania OZE, a w tym szczególnie biopaliw, oprócz niezaprzeczalnych efektów ekologicznych w skali globalnej, ma w polskich warunkach szczególnie istotne znaczenie w wymiarze społecznym. Powinna bowiem pociągnąć za sobą utworzenie nowych miejsc pracy, przy przygotowaniu i pozyskaniu surowca, przy produkcji oraz przy transporcie i dystrybucji tych paliw (Dreszer i in., 2003). Dodatkowo niezbędne będzie stworzenie systemu obsługi doradczej dla podmiotów inwestujących w OZE (Szeptycki i Wójcicki, 2003).

Według wielu szacunków, należy się spodziewać dynamicznego wzrostu produkcji biopaliw w różnej postaci: ciekłych, gazowych i stałych. Biomasa stanowi obecnie trzecie co do wielkości, źródło energii odnawialnej i jest coraz bardziej znaczącym substytutem paliw kopalnych.



Źródło: opracowanie własne wg *Energia ze źródeł odnawialnych w 2012 roku*

Rysunek 1.2. Udział energii ze źródeł odnawialnych w energii pierwotnej ogółem w UE

Ciepło pozyskiwane z biomasy to dwie trzecie energii pochodzącej z OZE i jak wynika z prognoz, będzie to w najbliższej przyszłości (do roku 2020), jedno z najważniejszych źródeł energii odnawialnej (tab.1.1).

Tabela 1.1. Suma energii odnawialnej do ogrzewania i chłodzenia (RES-H / C) dla wszystkich 27 państw członkowskich Unii Europejskiej

Rodzaj nośnika energii	Rok				Udział (%) ^a	Udział (%) ^b
	2005 (Mtoe)	2010 (Mtoe)	2015 (Mtoe)	2020 (Mtoe)		
Geotermia	0.4	0.7	1.3	2.6	2.3	1.0
Energia słoneczna	0.7	1.4	3.0	6.3	5.6	2.6
Biomasa stała	47.7	53.8	63.3	77.2	69.2	31.4
Biogaz	0.6	1.5	2.9	5.0	4.5	2.0
Biopaliwa płynne	1.1	3.6	4.1	4.4	3.9	1.8
Biomasa (suma częściowa)	49.4	58.9	70.2	86.5	77.6	35.2
Pompy ciepła powietrzne	0.1	2.3	3.7	6.1	5.5	2.5
Pompy ciepła ziemne	0.2	1.2	2.3	4.1	3.7	1.7
Pompy ciepła wodne	0.0	0.2	0.3	0.5	0.5	0.2
Energia odnawialna pomp ciepła (suma częściowa)	0.6	4.0	7.2	12.1	10.9	4.9
Suma energii odnawialnej do ogrzewania i chłodzenia	54.6	67.8	84.7	111.5	100.0	45.4

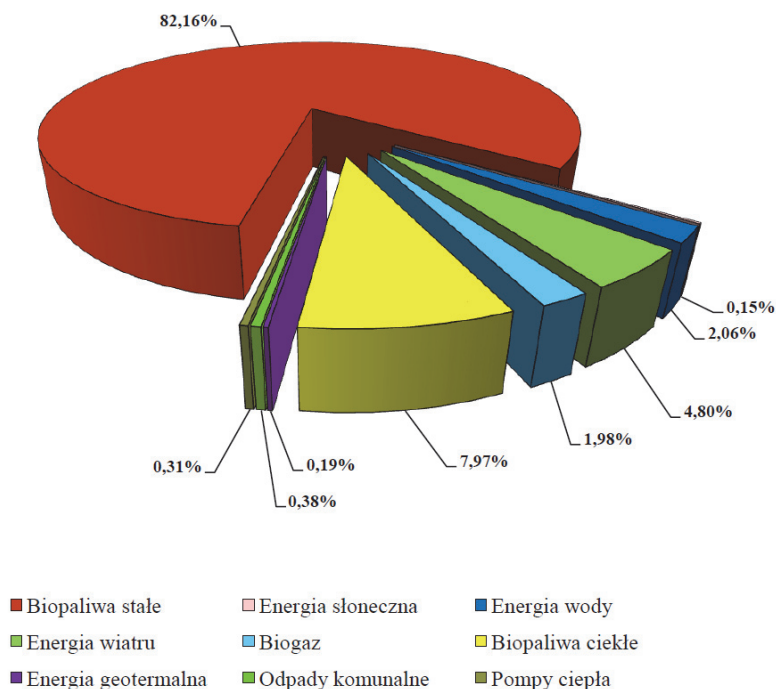
^a wartość procentowa odnosi się do udziału poszczególnych technologii w całkowitej energii odnawialnej do ogrzewania i chłodzenia w 2020 roku.

^b wartość procentowa odnosi się do udziału poszczególnych technologii w całkowitej ilości energii ze źródeł odnawialnych (energii elektrycznej, ogrzewania i chłodzenia oraz transportu) w 2020 roku.

Źródło: *Beurskens i Hekkenberg, 2011*

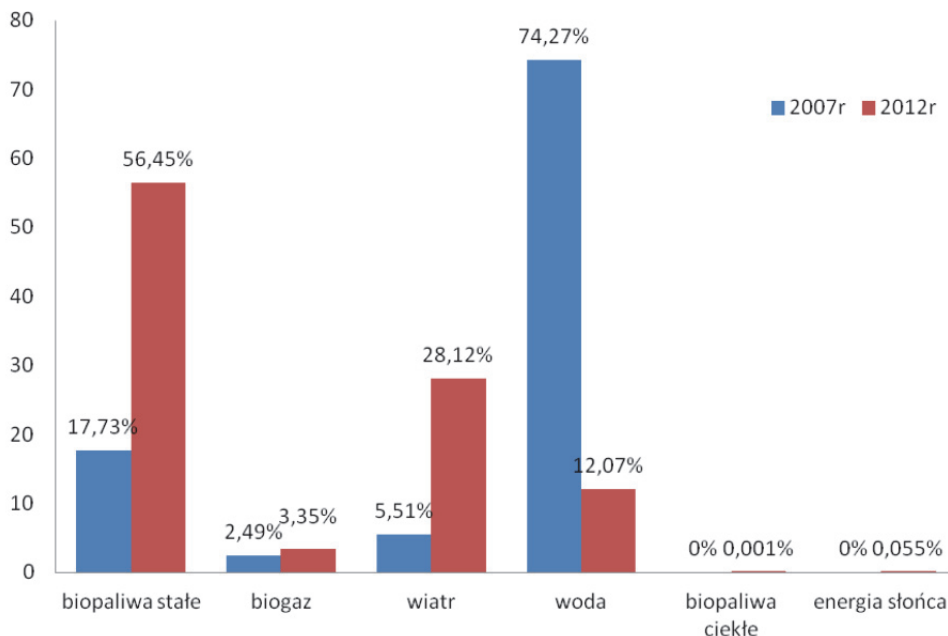
Stosunkowo prosta i łatwa do adaptowania technologia spalania biopaliw - w wielu przypadkach nie wymagająca istotnych zmian w budowie istniejących systemów spalania - oraz dostępność tańszego surowca sprawiają, że biomasa wykorzystywana w produkcji ciepła staje się konkurencją dla paliw tradycyjnych i w polskiej strukturze pozyskania energii z OZE jest ona dominującą. W roku 2012 stanowiła aż 82,16% OZE (rys. 1.3).

Ta tendencja, coraz szerszego wykorzystania biopaliw stałych w produkcji energii elektrycznej, jest bardzo wyraźna na przestrzeni ostatnich lat. Udział biopaliw stałych z poziomu 17,73% w 2003r wzrósł aż do 56,45% w roku 2012 (rys. 1.4).



Źródło: Energia ze źródeł odnawialnych w 2012 roku, GUS

Rysunek 1.3. Udział nośników energii odnawialnej w łącznym pozyskaniu energii ze źródeł odnawialnych w 2012 r.



Źródło: opracowanie własne na podstawie: *Energia ze źródeł odnawialnych w 2012 roku*, GUS

Rysunek 1.4. Procentowy udział nośników energii odnawialnej w produkcji energii elektrycznej w 2007r i 2012 r.

Powyższe prawidłowości zostały również uwzględnione w strategii rozwoju OZE opracowanej przez Ministerstwo Gospodarki „Krajowy plan działania w zakresie energii ze źródeł odnawialnych” (National Renewable Energy Action Plans, 2010), która określa krajowe cele w zakresie udziału tej energii w sektorach: transportowym, energii elektrycznej, ogrzewania i chłodzenia. Przewidywane zapotrzebowanie na energię finalną brutto (suma finalnego zużycia nośników energii na potrzeby energetyczne, strat energii elektrycznej i ciepła w czasie przesyłu i dystrybucji oraz zużycia własnego) pochodzącą ze źródeł odnawialnych zamieszczono w tabeli 1.2. Według prognozy, w roku 2030 – w stosunku do roku 2006 – przewidywany jest ponad sześciokrotny wzrost produkcji energii elektrycznej oraz około pięćdziesięcioprocentowy wzrost ilości ciepła pozyskiwanego z biomasy stałej.

Należy mieć świadomość, że wykorzystanie odnawialnych zasobów energii odnawialnej jest jednym z istotnych elementów zrównoważonego rozwoju państwa. Stopień ich wykorzystania jest uzależniony od wielkości zasobów oraz technologii przetwarzania. Ocenia się, że przy obecnie obowiązujących regulacjach prawnych, cenach energii elektrycznej i ciepła oraz stosowanym wsparciu finansowym, największy potencjał do wykorzystania w Polsce ma przede wszystkim biomasa, rozumiana jako drewno odpadowe z produkcji leśnej, uprawy roślin szybko rosnących (zwane uprawami energetycznymi), odpady komu-

nalne oraz odpady z przemysłu rolno-spożywczego. O powodzeniu wprowadzenia „pakietu 3x20” decydować więc będzie szereg działań, w tym m.in. rozwój technologii do energetycznego przetwarzania biomasy. Ograniczenia intensywnego wprowadzenia tych technologii to z jednej strony właściwości energetyczne biomasy, a z drugiej niedostatki komercyjnych rozwiązań związanych z energetycznym wykorzystaniem biomasy.

Tabela 1.2. Zapotrzebowanie na energię finalną brutto z OZE
w podziale na rodzaje energii (TJ)

Sposób wykorzystania	Rok					
	2006	2010	2015	2020	2025	2030
Energia elektryczna	370,6	715,0	1516,1	2686,6	3256,3	3396,3
Biomasa stała	159,2	298,5	503,2	892,3	953,0	994,9
Biogaz	13,8	31,4	140,7	344,5	555,6	592,6
Wiatr	22,0	174,0	631,9	1178,4	1470,0	1530,0
Woda	175,6	211,0	240,3	271,4	276,7	276,7
Fotowoltaika	0,0	0,0	0,0	0,1	1,1	2,1
Ciepło	4 312,7	4 481,7	5 046,3	6 255,9	7 048,7	7 618,4
Biomasa stała	4 249,8	4 315,1	4 595,7	5 405,9	5 870,8	6 333,2
Biogaz	27,1	72,2	256,5	503,1	750,0	800,0
Geotermia	32,2	80,1	147,5	221,5	298,5	348,1
Słoneczna	3,6	14,2	46,7	125,4	129,4	137,1

Źródło: National Renewable Energy Action Plans, 2010

W najbliższym czasie należy się spodziewać szybkiego wzrostu wykorzystania biomasy jako paliwa alternatywnego. Przemawia za tym długofalowa polityka UE, dzięki której stworzone zostaną odpowiednie bodźce ekonomiczne, które będą wspierały tworzenie konkurencyjnej gospodarki niskoemisyjnej.

Dodatkowym czynnikiem sprzyjającym temu procesowi jest wyraźny wzrost zainteresowania kogeneracją, czyli równoczesnym wytwarzaniem energii elektrycznej i ciepła, co pozwala na wzrost sprawności sumarycznej układu do ok. 85%. Jako paliwo często w tym systemie jest wykorzystywana biomasa (Frączek i in., 2012).

W świetle analizy przeprowadzonej przez Frączka i in. (2012), oprócz klasycznych źródeł biomasy leśnej i rolniczej, do wykorzystania jako biopaliwa nadają się prawie wszystkie rodzaje biomasy odpadowej pochodzącej z przemysłu rolno-spożywczego. W zależności od końcowego przeznaczenia (biopaliwa ciekłe, stałe i gazowe) muszą one być odpowiednio przetworzone.

Zgodnie z przytoczonymi wcześniej danymi, w energetyce zawodowej najszerzej wykorzystywane są biopaliwa stałe. W stanie nieprzetworzonym cechują się one niską gęstością usypową, co stwarza liczne problemy logistyczne – stałość dostaw, nieoptymalny transport na większe odległości. Dla zwiększenia tej gęstości i kaloryczności biomasa jest najczęściej przetwarzana w pelety lub brykiety. Wprawdzie realizacja procesu aglomeracji biomasy jest stosunkowo energochłonna ale przynosi wymierne korzyści, co przemawia za jego stosowaniem (tab.1.3).

Tabela 1.3. Korzyści płynące z zastosowania obróbki biomasy

Wyszczególnienie	Kosztowny transport, przechowywanie	Straty masy (energii) podczas przechowywania	Zagrożenia dla bezpieczeństwa podczas przechowywania	Problemy ze współmieleniem	Problemy z użytkowaniem istniejącej infrastruktury	Korozja	Formacja depozytów, aglomeracja
Suszenie	o	++	++	x	x	o	o
Rozdrabnianie	+	-	-	+	+	o	o
Balotowanie	++	+	+	x	x	o	o
Brykietowanie	+++	++ ¹	++ ¹	++	+	o ²	o ²
Peletyzacja	+++	++ ¹	++ ¹	++	++	o ²	o ²
Toryfikacja	o	+++	+++	+++	+	+	o
Toryfikacja +peletyzacja	+++	+++	+++	+++	+++	+	o ²

Oznaczenia : (+) niewielka poprawa; (++) znaczna poprawa; (+++) bardzo duża poprawa;
 (-) negatywny wpływ; (o) bez znaczenia; (x) brak danych;

¹ Jeżeli są zapewnione odpowiednie warunki przechowywania;

² Chyba, że w procesie zastosowano dodatki podwyższające punkt topnienia;

Źródło: Cocker-Maciejewska, 2007

2. UWARUNKOWANIA FORMALNO-PRAWNE PRODUKCJI ENERGII ODNAWIALNEJ PRZEZ PRODUCENTÓW ROLNYCH – PROSUMENTÓW

2.1. Charakterystyka możliwości wykorzystania energii odnawialnej w gospodarstwach rolnych

Energia jest podstawowym źródłem bez którego obecnie nie będzie funkcjonował żaden sektor gospodarki. Do tej pory w produkcji wykorzystywana jest głównie energia pochodząca ze źródeł konwencjonalnych (z uwagi na fakt, iż jest znacznie tańsza od energii odnawialnej). Sytuacja ekonomiczna związana z wykorzystywaniem paliw konwencjonalnych z roku na rok się zmienia. Ceny za energię konwencjonalną wzrastają i nadal będą wzrastać. Ma na to wpływ wiele czynników, między innymi związanych z sytuacją gospodarczą w państwie, uregulowaniami prawnym oraz ochroną środowiska. Stosowanie nowoczesnych technologii w pozyskiwaniu i przetwarzaniu niekonwencjonalnych źródeł energii pozwala na poprawę, dotychczas ciągle jeszcze niekorzystnych, relacji ekonomicznych w porównaniu ze źródłami konwencjonalnymi (Dreszer, Michałek, Roszkowski, 2003).

Wykorzystywanie energii konwencjonalnej jest jednym z czynników, który powoduje niekorzystne zmiany w świecie przyrody. Ochrona środowiska jest bardzo ważnym elementem, który ma zapewnić społeczeństwu poprawę jakości życia w tym żywności, wody, powietrza oraz rozwój rolnictwa. Rolnictwo jest gałęzią gospodarki, która szczególnie powinna wykorzystywać odnawialne źródła energii do celów produkcji surowców. Niestety nie jest to zjawisko powszechne, głównie z uwagi na wysokie koszty związane z pozyskiwaniem energii odnawialnej oraz ograniczenia prawne wynikające z obowiązujących przepisów.

O tym, że rolnictwo należy do najważniejszej gałęzi gospodarki każdego kraju, świadczą chociażby ogromne środki wydatkowane codziennie na żywność. Żywność jest dobrem nadrzędnym, a społeczeństwo coraz częściej zwraca uwagę na walory ekologiczne wyprodukowanego pokarmu, gdyż spożywanie skażonej żywności może wywoływać różne choroby lub nawet doprowadzić do śmierci. Ważnym problemem jest ograniczenie do minimum wpływu szkodliwych substancji na środowisko w trakcie jej wytwarzania.

Produkcja rolnicza, zarówno roślinna jak i zwierzęca, wymaga dużych nakładów energetycznych. Wysokie zmechanizowanie prac polowych, zautomatyzowana produkcja zwierzęca, przetwórstwo czy przechowywanie pochłania ogromne ilości energii. W związku z tym, warto więc zwrócić uwagę, by podczas produkcji zdrowej żywności maksymalnie ograniczać skażenie środowiska, wykorzystując energię czystą i neutralną dla otoczenia. Najkorzystniejszym rozwiązaniem jest wykorzystywanie energii z odnawialnych źródeł. Przyczyni się to na pewno do podniesienia jakości wyprodukowanej żywności, co z kolei przełoży się na poprawę zdrowia ludności. Dodatkową korzyścią dla rolnictwa jest

możliwość samodzielnego produkowania energii, w zależności od potrzeb własnych gospodarstwa rolnego.

Ważnym argumentem – z punktu widzenia rolnika – jest również szansa uzyskania dodatkowego dochodu ze sprzedaży produktów, takich jak odpady poprodukcyjne, odpady z chowu zwierząt, a także żywność niezakwalifikowana na cele żywieniowe, która i tak musi zostać zutylizowana, (co pociąga za sobą wysokie koszty). Kolejnym źródłem dochodu może być uprawa roślin energetycznych, jako alternatywa wykorzystania gleb wyłączonych z produkcji żywności.

Energia zużywana obecnie w gospodarstwach rolniczych, pochodzi z sieci energetycznej (energia elektryczna) oraz kopalin (ciepło z węgla, paliwo z ropy). Zastąpienie ww. nośników jest możliwe właśnie energią z odnawialnych, czystych, lokalnych źródeł, takich jak biomasa do produkcji ciepła i paliw ciekłych, energia słońca do produkcji energii cieplnej jak również elektrycznej, pozostałości z przetwórstwa rolno-spożywczego i chowu zwierząt jako substrat do biogazowni.

Poniżej przedstawiono przykłady wykorzystania energii powstającej ze źródeł odnawialnych w rolnictwie:

- proces fotosyntezy roślin (z reguły rośliny cechuje mała sprawność energetyczna w granicach 1-2% , dzięki uprawie roślin takich jak kukurydza czy słonecznik sprawność energetyczna może osiągnąć nawet ok. 10%) (Dreszer, Michałek, Roszkowski, 2003);
- generatory fotowoltaiczne mogą mieć zastosowanie jako źródła zasilania w pompach wodnych, urządzeniach ochrony pól, pastwisk i ogrodów przed szkodnikami, a także mogą być wykorzystywane w systemach nawadniania roślin, w wentylacji, do ładowania akumulatorów, jak również w aparaturze kontrolno-pomiarowej czy sygnalizującej;
- kolektory słoneczne są stosowane do ogrzewania wody użytkowej, nawadniania i deszczowania roślin w uprawach pod osłonami (tunele foliowe i szklarnie), podgrzewania wody w zbiornikach wodnych hodowli ryb, ogrzewania wody do przygotowywania paszy dla zwierząt, a także mogą być wykorzystywane do ogrzewania powietrza np. w przechowalnictwie i suszarniach płodów rolnych czy budynkach inwentarskich;
- sprężarkownie i pompownie wiatrowe mogą być zastosowane do pozyskiwania wody oraz do rekultywacji zbiorników wodnych (odpompowywania wód depresyjnych czy nawadniania);
- siłownie wiatrowe służą, także do napędzania kompresorów do napowietrzania naddennego i powierzchniowego w zbiornikach hodowli ryb;
- siłownie wiatrowe znajdują również zastosowanie do oświetlania i ogrzewania pomieszczeń inwentarskich i produkcyjnych, ogrzewania wody użytkowej, napędzania urządzeń technologicznych (np. aparatury do sporządzania pasz, do natleniania gnojowicy czy w wentylatorach do suszenia);
- energetyka wodna wpływa na rozwój turystyki i rekreacji, polepszenie stosunków wodnych, poprawy mikroklimatu i dodatniego wpływu na walory środowiskowe z zachowaniem biocenozy oraz aktywnie reguluje stosunki wodne znajdujących się w okolicy gospodarstw;

- ciepło pozyskane z instalacji geotermalnej może być wykorzystywane do ogrzewania pomieszczeń gospodarczych, szklarni, hodowli ryb, hodowli zwierząt oraz w zakładach zajmujących się przetwórstwem rolno-spożywczym;
- biogaz można wyprodukować z odchodów zwierzęcych, innych odpadów produkcji roślinnej, a także ścieków z przetwórstwa spożywczego i komunalnego, oraz zastosować go można między innymi do ogrzewania pomieszczeń, budynków, podgrzewania wody;
- biomasa (rośliny energetyczne, drewno, słoma) jest wykorzystywana na cele energetyczne do ogrzewania pomieszczeń, budynków inwentarskich, szklarni i tuneli foliowych, a także w suszarnictwie;
- biopaliwa ciekłe produkowane w gospodarstwach mogą być wykorzystywane do celów transportowych (paliwo dla maszyn i urządzeń rolniczych) (Dreszer i in., 2003).

Wyżej wymienione przykłady to tylko nieliczne sposoby wykorzystania energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych. Coraz częściej w gospodarstwach rolnych znajdują zastosowanie zintegrowane systemy energetyczne, charakteryzujące się współpracą między kilkoma różnymi odnawialnymi źródłami energii lub energią konwencjonalną a odnawialnymi źródłami energii. Systemy takie pozwalają zbilansować energetyczne zapotrzebowanie gospodarstwa i umożliwią szersze wykorzystanie energii pochodzącej ze źródeł alternatywnych. Rolnictwo posiada bardzo duże możliwości wykorzystywania energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych, gdyż cechuje się zapotrzebowaniem na niskotemperaturowe źródła, a ponadto posiada bardzo duże zasoby biomasy.

2.2 Uwarunkowania regulacyjno-prawne dedykowane dla energetyki rozproszonej i rozwiązań prosumenckich

Istotnym założeniem kształtującym sektor energetyczny jest dążenie państw do wypracowania tzw. modelu rozwoju zrównoważonego. Model ten ma na celu zbilansowanie względów ekonomicznych, społecznych oraz ekologicznych. Zakłada on kształtowanie konkurencyjnej gospodarki, wykorzystującej różne źródła energii niskoemisyjnej w tym również źródła odnawialne, w sposób racjonalny oraz prowadzący do oszczędności. Budowa Gospodarki Niskoemisyjnej to z jednej strony odpowiedź na wyzwania związane ze zmianą klimatu, z drugiej to kreowanie rozwoju gospodarczego w sposób zrównoważony.

Koncentrując się na zagadnieniu rozwoju gospodarczego, kluczowe jest zbudowanie optymalnego modelu nowoczesnej i energooszczędnej gospodarki zorientowanej na innowacyjność oraz zdolnej do konkurencji na europejskim i globalnym rynku. Do tej pory w polskiej polityce energetycznej prezentowany był przede wszystkim punkt widzenia wielkich, często państwowych, korporacji, który nie zawsze uwzględnia specyficzne warunki, panujące na terenach wiejskich, które stanowią około 93% obszaru Polski i zamieszkiwane są przez blisko 40% ludności.

Model energetyki prosumenckiej to taki, w którym odbiorca energii jest jednocześnie jej producentem i konsumentem. Mieszkańcy terenów wiejskich bez wątpienia wpisują się w definicję prosumenta, będącego odbiorcą energii w gospodarstwie domowym i jednocześnie wytwórcą energii elektrycznej w mikroinstalacji. Produkując ciepło lub energię elektryczną na własne potrzeby, prosument może ewentualnie ich nadwyżki sprzedać (Raport

„Energetyka prosumencka – możliwości i korzyści dla odbiorcy końcowego”). Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii może być szansą na wyrównanie warunków rozwoju, tym bardziej, że zróżnicowanie zasobów obszarów wiejskich tworzy szerokie możliwości kreowania innowacji i wykorzystania odnawialnych źródeł energii. Mogą one stać się jednym z ważniejszych czynników rozwoju obszarów wiejskich, redukując deficyty w zaopatrzeniu w energię i tym samym stabilizując warunki prowadzenia działalności rolniczej i gospodarczej oraz stanowiąc źródło dodatkowych dochodów mieszkańców wsi (Żmijewski, 2013).

Dynamiczny rozwój energetyki prosumenckiej obserwowany jest w coraz większej liczbie państw w Europie i na świecie. Przykładem może być Wielka Brytania, w której uruchomiono (w 2010 roku) specjalny program dedykowany energetyce prosumenckiej, który zakłada, że do roku 2020 powstanie ponad 40 tys. MW nowej mocy, głównie w postaci instalacji fotowoltaicznych montowanych na dachach gospodarstw domowych oraz przydomowych elektrowni wiatrowych.

Główne elementy składowe systemu energetyki prosumenckiej to (Żmijewski, 2013):

- małe instalacje OZE, które produkują energię elektryczną na potrzeby gospodarstwa domowego oraz sprzedają ją do sieci: np. moduły fotowoltaiczne, małe turbiny wiatrowe, urządzenia kogeneracyjne na biomasę czy gaz, w tym płynny;
- inteligentne urządzenia: np. pralki, suszarki do ubrań, zmywarki, które są sterowane w taki sposób, aby dostosować się do zmiennej taryfy sprzedawcy energii;
- centralny system zarządzania temperaturą, który potrafi automatycznie regulować temperaturę w obiekcie w oparciu o informacje od dostawcy prądu o kosztach energii w taryfach dynamicznie dostosowywanych do obciążenia sieci, jak również odpowiadać na potrzeby domowników;
- samochody elektryczne, które pozwalają w znaczny sposób ograniczyć zużycie energii na transport, jednocześnie mogą być magazynami energii elektrycznej.

W Polsce do września 2013 roku brak było regulacji określających pozycję prosumenta na rynku energii. W dniu 11 września 2013 roku weszła w życie nowelizacja ustawy – Prawo Energetyczne, która została wprowadzona ustawą z dnia 8 kwietnia 2014 roku (zmiana ustawy – Prawo Energetyczne z 1997 oraz niektórych innych ustaw, zwana jest potocznie „małym trójpakiem”). W ramach nowelizacji wprowadzono m.in., dwie nowe definicje powiązane z koncepcją prosumenta:

- mikroinstalacja – odnawialne źródło energii, o łącznej mocy zainstalowanej elektrycznej nie większej niż 40 kW, przyłączone do sieci elektroenergetycznej o napięciu znamionowym niższym niż 110 kV lub o łącznej mocy zainstalowanej cieplnej nie większej niż 120 kW.
- mała instalacja – odnawialne źródło energii, o łącznej mocy zainstalowanej elektrycznej większej niż 40 kW i nie większej niż 200 kW, przyłączone do sieci elektroenergetycznej o napięciu znamionowym niższym niż 110 kV lub o łącznej mocy zainstalowanej cieplnej większej niż 120 kW i nie większej niż 600 kW.

Zgodnie z nowym brzmieniem art. 7 ust. 8 pkt. 3 ustawy prawo energetyczne za przyłączenie mikroinstalacji do sieci dystrybucyjnej elektroenergetycznej nie pobiera się opłaty. Dodatkowo w przypadku, gdy podmiot ubiegający się o przyłączenie mikroinstalacji do sieci dystrybucyjnej jest przyłączony do sieci, jako odbiorca końcowy, a moc zainstalowana mikroinstalacji, której ubiega się ten podmiot, nie jest większa niż określona w wydanych warunkach przyłączenia, przyłączenie do sieci odbywa się jedynie na podstawie zgłoszenia przyłączenia mikroinstalacji. Zgłoszenie składane będzie w przedsiębiorstwie energetycz-

nym (OSD – Operator Sieci Dystrybucyjnej) do którego sieci, ma być ona przyłączona. Dodatkowo OSD na własny koszt instalować będzie odpowiednie układy zabezpieczające i układy pomiarowo-rozliczeniowe. Oczywiście przyłączane mikroinstalacje powinny spełniać wymagania techniczne i eksploatacyjne, które będą określone w rozporządzeniu wydanym na podstawie art. 9 ust. 3 ustawy prawo energetyczne (Żmijewski, 2013).

Zgodnie z art. 4. projektu ustawy o OZE, wytwórca energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii w mikroinstalacji, będący osobą fizyczną, który wytwarza energię elektryczną w celu jej zużycia na własne potrzeby, może sprzedawać nadwyżki wyprodukowanej przez siebie, niewykorzystanej energii, a zakład energetyczny musi taką energię odkupić po cenie wynoszącej 80% średniej ceny energii na rynku konkurencyjnym z roku ubiegłego. Zasada ta funkcjonuje już w prawie energetycznym od września ubiegłego roku, a jej obowiązywanie podtrzymują ostatnio publikowane wersje projektu ustawy o OZE. Nowe zapisy w projekcie ustawy o OZE, które dotyczą produkcji energii w mikroinstalacjach, wprowadzają do katalogu podmiotów objętych powyższymi zasadami także przedsiębiorców, którzy uruchomią swoje mikroinstalacje OZE (lub przeprowadzą ich modernizację) już po wejściu w życie ustawy.

Nowością w projekcie ustawy o OZE, w części poświęconej zasadom sprzedaży energii z mikroinstalacji, jest przyjęcie nowej zasady dot. sprzedaży energii z mikroinstalacji należących do przedsiębiorców. Aktualna wersja ustawy mówi, że cena sprzedaży tej energii ma wynosić 100% średniej ceny energii na rynku konkurencyjnym w roku ubiegłym. Nowa wersja projektu ustawy o OZE wprowadza także korzystne zmiany w zakresie sposobu rozliczeń prosumentów z zakładami energetycznymi. Ilość energii elektrycznej wytworzonej w mikroinstalacji, którą będzie musiał zakupić sprzedawca, będzie ustalana na podstawie rzeczywistych wskazań urządzeń pomiarowo-rozliczeniowych i będzie rozliczana w okresie półrocznym jako ilość energii elektrycznej stanowiącej nadwyżkę energii elektrycznej wytworzonej w mikroinstalacji i wprowadzonej do sieci w stosunku do ilości energii elektrycznej pobranej z sieci w tym półroczu (Net-metering: zmiany dla prosumentów w nowym projekcie ustawy o OZE).

Należy także podkreślić, że w obowiązującym od 11 września 2013 roku stanie prawnym, wytwarzanie energii elektrycznej w mikroinstalacji przez osobę fizyczną niebędącą przedsiębiorcą w rozumieniu ustawy o swobodzie działalności gospodarczej, a także sprzedaż tej energii przez tę osobę, nie jest działalnością gospodarczą w rozumieniu tej ustawy. Mikroinstalacje takie nie posiadają bezpośrednio tytułu do uzyskiwania praw majątkowych wynikających ze świadectw pochodzenia dla energii wytworzonej w OZE (zielonych certyfikatów). Podkreślić tutaj trzeba, że zgodnie z zapisem ustawy osoby fizyczne prowadzące działalność gospodarczą na wytwarzanie energii nie są traktowani tak jak duże przedsiębiorstwo, co wyklucza z dobrodziejstw Ustawy około 1674 tys. podmiotów – mikro przedsiębiorców.

Prosumenci wytwarzający energię elektryczną z mikroinstalacji będą mogli odsprzedać nadwyżki energii elektrycznej sprzedawcom zobowiązanym do jej zakupu z urzędu. Zgodnie bowiem z zapisami art. 9 ustawy prawo energetyczne, energię elektryczną wytworzoną w mikroinstalacji przyłączonej do sieci dystrybucyjnej znajdującej się na terenie obejmującym obszar działania sprzedawcy, oferowaną do sprzedaży przez posiadacza mikroinstalacji jest obowiązany zakupić ten sprzedawca.

Nowelizacja ustawy prawo energetyczne nie tworzy warunków do budowania mikro-sieci oraz tworzenia tzw. spółdzielni energetycznych, bez względu na ich formę prawną

(spółdzielnia, fundacja, stowarzyszenie, spółka itd.) w zakresie wytwarzania i sprzedaży energii (energia elektryczna, ciepło). W związku z powyższym na podstawie art. 3 pkt. 12 znowelizowanej ustawy prawo energetyczne spółdzielnie są przedsiębiorstwem energetycznym nawet jeśli nie odsprzedają wytworzonej energii elektrycznej. Do podmiotów tych mają zastosowanie w szczególności przepisy art. 9 ustawy wskazujące na ciężące na nich obowiązki względem operatora oraz przepisy dotyczące sprzedaży energii elektrycznej i uzyskania świadectw pochodzenia za każdą wytworzoną MWh w instalacji OZE spółdzielni (Żmijewski, 2013).

2.3. Obowiązek koncesyjny lub rejestracyjny oraz skutki ich braku

Art. 32 ust.1 pkt 1 ustawy z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo Energetyczne określa, iż koncesję muszą uzyskać podmioty wykonujące działalność gospodarczą w zakresie wytwarzania energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii, z wyłączeniem między innymi biogazowni rolniczych, bez względu na ilość wyprodukowanej energii, czy na wielkość mocy zainstalowanej. Tak więc obowiązkiem koncesji są objęte wszystkie przedsiębiorstwa energetyczne produkujące energię z OZE z wyjątkiem energii wytwarzanej w oparciu o biogaz rolniczy. Koncesja wydawana jest przez Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki. Natomiast działalność gospodarcza prowadzona w celu produkcji biogazu rolniczego jest, w rozumieniu ustawy z dnia 2 lipca 2004 r. o swobodzie działalności gospodarczej (Dz.U. Nr 173, poz. 1807 z późn. zm.), działalnością regulowaną, a w związku z tym podlega wpisowi do specjalnie prowadzonego rejestru przedsiębiorstw energetycznych zajmujących się wytwarzaniem biogazu rolniczego. Rejestr prowadzony jest przez Prezesa Agencji Rynku Rolnego (ARR).

Działalność gospodarcza w zakresie wytwarzania energii pochodzącej z OZE wymaga koncesji wydawanej przez Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki. Koncesja jest wydawana przedsiębiorcom (w tym osobom fizycznym), którzy spełniają następujące warunki:

- mają siedzibę lub miejsce zamieszkania na terytorium państwa członkowskiego Unii Europejskiej, Konfederacji Szwajcarskiej lub państwa członkowskiego Europejskiego Porozumienia o Wolnym Handlu (EFTA) – strony umowy o Europejskim Obszarze Gospodarczym;
- dysponują środkami finansowymi w wielkości gwarantującej prawidłowe wykonywanie działalności, bądź są w stanie udokumentować możliwości ich pozyskania, oraz mają możliwości techniczne gwarantujące prawidłowe wykonywanie działalności;
- zapewnią zatrudnienie osób o właściwych kwalifikacjach zawodowych, które określa ustawa – Prawo Energetyczne;
- uzyskali decyzję o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu.

Koncesja nie może być wydana wnioskodawcy, który spełnia którykolwiek z poniższych warunków:

- znajduje się w postępowaniu upadłościowym lub likwidacji;
- któremu w ciągu ostatnich 3 lat cofnięto koncesję z przyczyn wymienionych w ustawie o swobodzie działalności gospodarczej lub którego w ciągu ostatnich

3 lat wykreślono z rejestru działalności regulowanej z przyczyn, o których mowa w tej ustawie;

- skazanemu prawomocnym wyrokiem sądu za przestępstwo mające związek z przedmiotem działalności gospodarczej określonej w ustawie – Prawo Energetyczne.

Koncesji udziela się na czas oznaczony, nie krótszy niż 10 lat i nie dłuższy niż 50 lat, chyba że przedsiębiorca wnioskuje o udzielenie koncesji na czas krótszy.

Udzielenie koncesji przedsiębiorcy działającemu w sektorze energetycznym podlega opłacie skarbowej w wysokości 616 zł. Dodatkowo, przedsiębiorca zobowiązany jest do wnoszenia opłat rocznych na rzecz Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki. Opłaty są obliczane jako iloczyn rocznego przychodu uzyskiwanego z działalności koncesjonowanej oraz współczynnika, który w zakresie wytwarzania, magazynowania, przesyłania, dystrybucji i obrotu energią elektryczną, ciepłem i paliwami gazowymi wynosi 0,0006 (Morawski, 2013). W przypadku obowiązku rejestracyjnego wpis do rejestru muszą posiadać wytwórcy energii elektrycznej z biogazu rolniczego oraz wytwórcy biogazu rolniczego, a kompetencje w tym zakresie posiada Prezes Agencji Rynku Rolnego. Wpis może uzyskać osoba, która posiada tytuł prawny do obiektów budowlanych oraz dysponuje odpowiednimi urządzeniami technicznymi i obiektami budowlanymi. Skutkami braku koncesji lub rejestru rejestracji są odmowa wydania świadectwa OZE, brak możliwości żądania zakupu lub odbioru przesyłu energii elektrycznej. Należy pamiętać również o tym, że wykonywanie działalności gospodarczej bez wymaganej prawem koncesji stanowi wykroczenie. System wsparcia rolniczych producentów energii odnawialnej dotyczy zwolnienie z opłat źródeł OZE do 5MW: opłaty skarbowej za wydanie koncesji, rocznej opłaty koncesyjnej, za wpis do Rejestru Świadectw Pochodzenia oraz dokonywanie zmian w tym rejestrze, opłaty skarbowej za wydanie Świadectw Pochodzenia.

2.4. Szanse i zagrożenia wynikające ze stosowania odnawialnych źródeł energii w gospodarstwach rolnych

W dotychczasowym układzie polskie rolnictwo zużywa stosunkowo mało energii. Głównymi jej odbiorcami – tak jak na całym świecie – jest przemysł, który w naszym kraju zużywa przeszło 60% całkowitej energii pierwotnej (Zużycie energii ..., GUS 2002). Rolnictwo znajduje się na 4-tym miejscu zużywając jej ok. 6%. Spośród 20 rodzajów nośników energii w rolnictwie najważniejszą rolę odgrywają: olej napędowy, węgiel, energia elektryczna, benzyna, mazut oraz gaz ziemny. Przypada na nie łącznie 97% ogólnego zapotrzebowania. W najbliższym czasie większego znaczenia zaczną nabierać energia elektryczna, ze względu na łatwość użytkowania „czystą postać” oraz cenę (Dreszer i in., 2003). Nowoczesne systemy produkcji zwierzęcej uwarunkowane są między innymi niezawodnością dostaw energii elektrycznej.

Obserwowane zmiany restrukturyzacyjne obszarów wiejskich, w tym gospodarstw rolniczych, stwarzają możliwości produkcji energii na tych obszarach z różnych źródeł, w tym bioenergetycznych. Każde państwo członkowskie Unii Europejskiej sformułowało swoje Krajowe Plany Działania (KPD) w zakresie energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych. A najlepszym sektorem na osiągnięcie celów założonych w Krajowym Planie Działania

(KPD) każdego z państw jest rolnictwo, gdyż to właśnie ta gałąź jest dobrze przygotowana do produkcji i wykorzystywania energii pochodzącej ze źródeł alternatywnych.

Obecne trendy pokazują, iż najszybciej rozwijającą się branżą jest energetyka odnawialna, mająca zastosowanie najczęściej na terenach wiejskich, z uwagi na sprzyjające ku temu warunki. Funkcjonowanie istniejących gospodarstw rolnych jest bardzo ściśle związane z wykorzystywaniem energii, przez co rolnicy są zmuszeni do poszukiwania nowych źródeł jej zaopatrzenia oraz prowadzenia racjonalnej gospodarki energetycznej (Krajowy Plan Działania, 2013).

Szacunki dotyczące skali rozwoju wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w oparciu o mikroinstalacje dowodzą, że przy potencjale ok. 4,4 mln gospodarstw domowych na wsi i znikomej skali jego samowykorzystania (ok. 7%), przy założeniu, że każda mikroinstalacja będzie miała (średnio) moc 3 kW, uzyskamy w sumie moc zainstalowaną wynoszącą 1320 MW. Warto przy tym także zwrócić uwagę na fakt, że małe instalacje mogą dawać szereg dodatkowych korzyści. Na przykład, w odniesieniu do współspalania biomasy, wysokiej jakości kotły małej mocy są bardziej efektywne (praktycznie 3 krotnie), przez co do produkcji tej samej ilości energii wykorzystywanych jest mniej lokalnych zasobów energetycznych. „Zaoszczędzony” dzięki temu surowiec może być wykorzystany w systemie energetycznym (zamiast paliw kopalnych) w innych instalacjach i przyczynić się do dalszej redukcji emisji gazów cieplarnianych. Co więcej, wykorzystanie biomasy w systemach energetycznych ma również wiele innych zalet środowiskowych. Wymiana indywidualnego kotła węglowego na kocioł biomasowy przyczynia się nie tylko do redukcji emisji gazów cieplarnianych, ale również do ograniczenia tzw. niskiej emisji i innych zanieczyszczeń tj. dwutlenku siarki, tlenków azotu. W wielu przypadkach możliwa jest również wymiana kotłów grzewczych na kotły wysokosprawne energetycznie.

Pomimo wykazanego powyżej potencjału i potrzeb obszarów wiejskich w zakresie wykorzystania OZE, trzeba mieć świadomość, że zwłaszcza w przypadku rodzin rolniczych, istotną przeszkodą we wdrażaniu rozwiązań niskoemisyjnych jest brak możliwości sfinansowania mikroinstalacji zarówno ze środków własnych, jaki i przy wykorzystaniu kredytów. W dalszym ciągu bowiem dochody rolników są niższe niż przeciętne dochody pozostałych grup zawodowych (Żmijewski, 2013).

W tej sytuacji alternatywą może być program „Prosument”, którego szczegółowe warunki ustalone zostały 28 lutego 2014 r. na posiedzeniu Rady Nadzorczej Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Główne założenia programu mają na celu dofinansowanie zakupu i montażu mikroinstalacji odnawialnych źródeł energii. Instrument skierowany będzie do osób fizycznych, a także wspólnot i spółdzielni mieszkaniowych. Finansowanie będzie dotyczyło zarówno nowych instalacji energooszczędnych, jak też wymiany istniejących instalacji na bardziej efektywne. Rodzaje przedsięwzięć obejmują zakup i montaż mikroinstalacji odnawialnych źródeł energii typu prosumenckiego do produkcji energii cieplnej i elektrycznej: kotłów na biomasę, pomp ciepła, kolektorów słonecznych, systemów fotowoltaicznych, małych elektrowni wiatrowych i układów mikrokogeneracyjnych. Wiadomo już, że „Prosument” z łącznym budżetem 600 mln złotych będzie podzielony na dwa etapy. W pierwszym z nich, który obejmie lata 2014-2015, wydanych zostanie 200 mln złotych. Kwota 100 mln złotych zostanie przeznaczona dla prosumentów, wspólnot i spółdzielni mieszkaniowych, a kolejne 100 mln dla jednostek samorządu terytorialnego. Dotacja w ramach tego etapu wyniesie odpowiednio 40% dla instalacji fotowoltaicznych oraz małych elektrowni wiatrowych oraz 20% dla

pozostałych instalacji OZE typu kolektory słoneczne czy pompy ciepła. W drugim etapie programu, który obejmie lata 2016-2020, na dofinansowanie przeznaczonych zostanie 400 mln złotych. Połowa tej kwoty zostanie przeznaczona dla prosumentów, wspólnot i spółdzielni mieszkaniowych, a połowa dla jednostek samorządu terytorialnego. W tym etapie kwota dotacji wyniesie 30% dla instalacji fotowoltaicznych oraz małych elektrowni wiatrowych oraz 15% dla pozostałych instalacji OZE typu kolektory słoneczne i pompy ciepła. Zmianie nie ulegnie natomiast oprocentowanie kredytu, które w skali roku wynosić będzie 1 proc. Do obsługi programu zostanie wybrany tylko jeden bank lub konsorcjum (Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej).

Produkowanie i wykorzystywanie energii pozyskiwanej z alternatywnych źródeł wiąże się z różnymi korzystnymi i mniej korzystnymi aspektami dla środowiska, społeczeństwa, gospodarki, a tym samym dla rolnictwa. Do pozytywnych aspektów produkcji i wykorzystywania energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych dla gospodarstw rolnych należą:

- dywersyfikacja dochodów, która pozwoli na uzyskanie dodatkowych zysków z prowadzonej działalności;
- zwiększenie wartości dodanej, powstałej w wyniku wprowadzenia nowej technologii produkcji w gospodarstwie;
- możliwość pozyskania energii z innych źródeł, niż sieciowe; pozyskanie czystej i łatwo odnawialnej energii;
- nieograniczone zasoby energii;
- zrównoważony sposób gospodarowania zasobami naturalnymi;
- wszechstronność zastosowań energii pochodzącej z OZE na cele bytowe, produkcyjne, przetwórcze lub przechowalnicze;
- produkcja energii w zależności od własnych potrzeb gospodarstwa;
- możliwość zagospodarowania terenów rolnych nie wykorzystywanych rolniczo – stworzenie nowych miejsc pracy dla lokalnej ludności;
- redukcja CO₂ i emisji innych gazów cieplarnianych wpływających niekorzystnie na środowisko naturalne jako przeciwdziałanie zmianom klimatu;
- mniejsza zależność od dostaw surowców konwencjonalnych (takich jak gaz, ropa naftowa);
- uniezależnienie się od rosnących cen energii na rynku;
- bezpieczeństwo energetyczne rozumiane jako stabilizacja napięć;
- poprawa poziomu napięć dla odbiorców końcowych na terenach wiejskich polegająca na ograniczeniu poziomu przerw w dostawie prądu;
- wzbogacania lokalnej infrastruktury technicznej (np. unowocześnienie i rozwój sieci niskiego napięcia, rozbudowa sieci transformatorów, budowa dróg);
- pozytywny wpływ na wizerunek gmin rolniczych oraz turystycznych;
- korzystny wpływ na poprawę zdrowia ludności lokalnej;
- kształtowanie postaw i świadomości ekologicznej społeczeństwa;
- podnoszenie konkurencyjności polskiego rolnictwa wraz z obniżeniem kosztów produkcji rolniczej;
- korzystny wpływ na rozwój sektora rolnictwa, a przez to pojawiające się nowe korzyści i możliwości dla gospodarstw rolnych;
- poprawa wizerunku rolnictwa w Europie przy dobrze poinformowanym społeczeństwie może mieć wpływ na polepszenie klimatu inwestycyjnego oraz standar-

dów życia na obszarach wiejskich oraz rozwój obszarów wiejskich poprzez stworzenie warunków do działalności pozarolniczej na terenach gmin.

Do negatywnych aspektów produkcji i wykorzystywania energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych dla gospodarstw rolnych należą:

- wysokie koszty budowy i utrzymania inwestycji; dodatkowe zadłużenie się; uzależnienie od warunków atmosferycznych (np. elektrownie wodne zależą od opadów deszczu, energia promieniowania słonecznego od usłonecznienia, energia wiatru od siły wiatru);
- utrudnienia administracyjne związane z uzyskaniem pozwoleń na wytwarzanie energii z OZE;
- zawile i skomplikowane procedury otrzymania dofinansowania; niekorzystna rywalizacja z produkcją na cele spożywcze (np. wykorzystanie roślin oleistych do produkcji biodiesla);
- niekorzystny wpływ na walory przyrodnicze (np. farmy wiatrowe stwarzają zagrożenie dla ptactwa, elektrownie wodne powodują niszczenie naturalnych siedlisk roślin i zwierząt, uprawa roślin energetycznych przyczynia się do zubożenia gleb i powstawania monokultur);
- zmiana walorów krajobrazowych (np. instalacja wiatraków, ogniw fotowoltaicznych zajmuje rozległe obszary);
- zagrożenie dla ludzi (np. hałas i wibracje turbin wiatrowych);
- narastające konflikty społeczne powstające podczas udziału społeczeństwa w ocenie oddziaływania na środowisko;
- trudności związane z lokalizacją inwestycji w obrębie obszarów chronionych oraz chronionych siedlisk przyrodniczych;
- większe nakłady pracy w gospodarstwie;
- rozłożona w dłuższym okresie czasu rentowność.

Dotychczasowe rozważania wskazują, że rolnictwo jak i inne sektory gospodarki narodowej stoją przed wielkim wyzwaniem przejścia od systemu „brudnych” paliw do systemu „czystych elektronów”, wysokiego poziomu sprawności energetycznej i do racjonalnego gospodarowania energią. Aby jednak podołać temu wyzwaniu należy postępować strategicznie poprzez zbudowanie zintegrowanego systemu planowania obejmującego zarówno konwencjonalne, jak i odnawialne źródła energii. Fundamentem tych działań powinny być jednak dostosowane regulacje formalno-prawne, których zmiany muszą nadążać za zmieniającą się rzeczywistością generującą nowe potrzeby i zagrożenia. Polskie rolnictwo potrzebuje zarówno poprawy produktywności energetycznej, jak i etyki poszanowania energii. Realizacja tego celu wymaga opracowania rządowej polityki, regulacji prawnych, odpowiednich programów B+R, subwencjonowania, bodźców podatkowych, które będą stymulowały system w kierunku innowacji, wytwarzania i komercjalizacji czystej energii, poprawy sprawności energetycznej i racjonalnego wykorzystania (Krawiec, 2010).

3. TECHNOLOGIE WYTWARZANIA BIOGAZU Z MONOSUBSTRATÓW

Polityka energetyczna Unii Europejskiej (UE) i wynikające z niej zapisy prawa wspólnotowego, nakładają na państwa członkowskie UE obowiązek zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) w całości produkowanej i zużywanej energii. W ramach tak wyznaczonego celu zakłada się wzrost udziału OZE w całkowitym zużyciu energii przez państwa członkowskie UE. Szczegółowe cele zawarto w uregulowaniach tzw. dyrektywie 3x20, w których zakłada się m.in. zastępowanie paliw kopalnych energią odnawialną. Jedną z nich jest biogaz. Wytwarzanie biogazu zarówno z odpadów pochodzenia zwierzęcego jak i wybranych roślin, w tym również z roślin energetycznych (a więc roślin o niskich wymaganiach glebowych oraz takich, które są zalecane do uprawy na terenach rekultywowanych), z pewnością przysłuży się do realizacji zakładanych celów – zastępowania paliw konwencjonalnych OZE.

Szerokie stosowanie fermentacji metanowej, oprócz aspektów ekologicznych, energetycznych, socjalnych, ekonomicznych spowoduje również poprawę walorów środowiskowych terenów wiejskich. Należy mieć świadomość, że funkcjonujące obecnie w Polsce biogazownie rolnicze to głównie scentralizowane obiekty, a wykorzystywanym w nich substratem jest przede wszystkim kiszonka z kukurydzy i w niewielkim stopniu nawozy naturalne.

Mimo wyraźnej tendencji wzrastającego zainteresowania produkcją biogazu, w rolnictwie polskim nadal często brakuje odpowiedniej wiedzy i technologii. Wiedza z zakresu instalacji biogazowych oparta jest głównie o doświadczenia niemieckie, gdzie znaczenie wcześniej wdrożono szereg procedur do praktyki (Krajowy Plan Rozwoju Mikroinstalacji, 2013). Udana wdrożenie jak największej liczby projektów związanych z instalacjami biogazu, wymagać będzie sprawnego przekazywania informacji dotyczących licznych aspektów prawnych, ekologicznych, administracyjnych, organizacyjnych i logistycznych, na drodze od rolnictwa do technologii energetycznych.

Rozwój rynku doprowadził do powstania wielu wariantów rozwiązań technicznych, dostosowanych do różnorodnych potrzeb użytkowników. Nadal jednak brakuje niezależnego pełnego, popartego naukowymi badaniami przeglądu w zakresie aktualnie dostępnych na rynku innowacyjnych technologii, w tym technologii zagospodarowania pozostałościami procesu (poferment i ciecz nadosadowa). Mimo istnienia prawnych przepisów ich odzysku w metodzie R10, zupełnie brak w literaturze polskiej aplikacyjnego charakteru w tym zakresie. Wynika to generalnie z małej liczby biogazowi rolniczych.

Niemieccy naukowcy i praktycy (Krajowy Plan Rozwoju Mikroinstalacji, 2013) stwierdzają, że w wielu instalacjach przy wyborze substratów niewiedza inwestora jest przyczyną łamania elementarnych reguł obowiązujących w biotechnologii. Reguły te należy znać, aby wykluczyć błędy przy budowaniu kolejnych systemów (Adamowicz, 2005).

Wytwarzanie biogazu na drodze fermentacji metanowej może być przeprowadzane w różnych wariantach technologicznych. Do klasyfikacji technologii wytwarzania biogazu można przyjąć następujące kryteria: liczbę etapów procesu technologicznego (jednoetapowa, dwuetapowa, wieloetapowa), temperaturę procesu technologicznego, tryb napełniania materiałem fermentorów oraz zawartość substancji suchej w substratach.

Liczba etapów procesu technologicznego

W biogazowniach rolniczych najczęściej stosuje się jedno, bądź dwuetapową technologię wytwarzania biometanu, przy czym główne zainteresowanie skupia się na instalacjach jednoetapowych z komorami pofermentacyjnymi (zamkniętymi lagunami), gdzie następuje odgazowywanie pofermentu (Schulz i Eder, 2001). W instalacjach takich nie występuje przestrzenne rozdzielanie poszczególnych faz procesu fermentacji (hydrolizy, fazy zakwaszania, tworzenia kwasu octowego i metanu). Wszystkie fazy procesu technologicznego przebiegają w fermentorze. Natomiast w metodach dwu- lub wieloetapowych dokonuje się przestrzennego oddzielenia poszczególnych faz procesu na różne zbiorniki.

Temperatura procesu wytwarzania biogazu ściśle uwarunkowana jest rodzajem bakterii jakie wykorzystuje się podczas procesu fermentacji (bakterie: psychrofilowa, mezofilowa, termofilowa). W biogazowniach mezofilowych fermentory eksploatuje się w przedziale temperatur 32-38°C, natomiast w termofilowych w zakresie od 42 do 55°C, przy czym wymienione granice są umowne (w wielu przypadkach stosuje się wyższy zakres temperatur). Ponadto temperatura fermentatora może być optymalizowana w zależności od zastosowanego substratu. W zakresie mezofilowym pracuje 85% biogazowni rolniczych. Instalacje pracujące w zakresie termofilowym są częściowo połączone z mezofilowym zakresem temperatur procesu technologicznego (Weiland i Rieger, 2001).

Tryb napełniania materiałem

Tryb napełniania (nieciągły, quasi-ciągły, ciągły) zdeterminowany jest w znacznym stopniu dostępnością świeżego substratu. Napełnianie komory fermentacyjnej nieciągłe można podzielić na okresowe i tzw. metodę zbiorników wymiennych. W procesie okresowym zbiornik fermentacyjny napełniany jest świeżym substratem, po czym zamyka się go hermetycznie i odcina dostęp powietrza. Po upływie zadanego czasu przetrzymania, zbiornik zostaje opróżniony i napełniony świeżym wsadem, przy czym zawsze na dnie pozostawia się niewielką ilość przefermentowanego materiału w celu zaszczepienia świeżego substratu i zapoczątkowania procesu. W metodzie okresowej, produkcja gazu (jego ilość i jakość) jest zmienna w czasie.

Metoda zbiorników wymiennych opiera się na pracy z dwoma zbiornikami fermentacyjnymi. Pierwszy jest stopniowo i równomiernie napełniany substratem, podczas gdy substrat zalegający w drugim, napełnianym do maksymalnego poziomu technologicznego, zbiorniku jest poddawany procesowi fermentacji. Kiedy napełnianie pierwszego zbiornika zostaje zakończone, wówczas drugi zbiornik zostaje w całości opróżniany, po czym napełnia się go stopniowo świeżym materiałem.

W quasi-ciągłym i ciągłym trybie napełniania można wyróżnić metodę przepływową, metodę magazynowania oraz kombinowaną metodę magazynowo-przepływową. W przeciwieństwie do ciągłego trybu napełniania, w trybie quasi-ciągłym przynajmniej raz w ciągu dnia roboczego wprowadza się do fermentatora ładunek substratu (Weiland i Rieger, 2001).

Większość biogazowni pracuje na zasadzie przepływu. W tej technologii, z jednego zbiornika magazynowego, ewentualnie ze zbiornika wstępnego, substrat jest przepompowywany periodycznie do zbiornika fermentacyjnego, w którym następuje równoczesne

odprowadzanie z bioreaktora równoważnej ilości substratu (już przefermentowanego) do zasobnika odpadów pofermentacyjnych. Bioreaktor w takim procesie cały czas jest wypełniony - opróżnia się go jedynie na czas remontów. Metoda ta odznacza się równomierną produkcją biogazu i dobrym wykorzystaniem komory fermentacyjnej. Istnieje jednak pewne zagrożenie związane z możliwością przedostawania się części świeżego substratu do zasobnika odpadu pofermentacyjnego (Weiland i Rieger, 2001).

W metodzie magazynowej fermentator i zbiornik odpadów pofermentacyjnych są jedną komorą. Przy odprowadzaniu przefermentowanego substratu ten połączony zbiornik nie jest opróżniany do końca, ponieważ pozostawia się w nim resztkę materiału potrzebną do zaszczepienia świeżego substratu. Następnie zbiornik ten jest powoli wypełniany stale dodawanym substratem pobieranym ze zbiornika wstępnego. Produkcja gazu przy tej metodzie jest mniej równomierna niż przy przepływowej, za to łatwiej tu uzyskać dłuższe czasy przetrzymania masy substratu w zbiorniku (Weiland i Rieger, 2001).

W biogazowniach pracujących według kombinowanej metody przepływowo-magazynowej zbiornik osadów pofermentacyjny jest również zakryty. W ten sposób, powstający tu biogaz może być również wychwytywany i wykorzystywany. A więc zbiornik odpadów pofermentacyjnych funkcjonuje jako „instalacja magazynowa“. W tym układzie instalacyjnym część magazynującą poprzedza podłączony do niej fermentator przepływowy. Z niego również można wybierać substrat, gdy np. istnieje zapotrzebowanie na duże ilości przefermentowanego substratu jako nawozu. Metoda ta pozwala na równomierną produkcję gazu. Natomiast nie da się w niej dokładnie ustalić czasów przetrzymania, ponieważ w fermentatorze przepływowym mogą pojawiać się przepływy obejściowe (Weiland i Rieger, 2001).

Zawartość substancji suchej w substratach (fermentacja mokra, fermentacja sucha)

Jednoznaczny podział metod na fermentację mokrą i suchą z biologicznego punktu widzenia nie jest właściwy, ponieważ bakterie biorące udział w procesie fermentacji zawsze potrzebują wilgotnego środowiska do przeżycia. Z tego powodu podział na fermentację mokrą lub suchą dokonuje się na podstawie zawartości suchej masy materiału w komorze fermentacyjnej. Nie ma dokładnej definicji granicy między fermentacją mokrą i suchą. W praktyce przyjęło się, że fermentacja mokra ma miejsce wtedy, gdy zawartość masy suchej w fermentorze wynosi od 8 do 15%, a zawartość wody umożliwia pompowanie materiału. Jeśli zawartość suchej masy wzrośnie powyżej 16%, to materiał przeważnie traci zdolność do pompowania i mówi wtedy można o fermentacji suchej. W biogazowniach rolniczych, niemal wyłącznie, zastosowanie znajduje proces fermentacji mokrej. Natomiast gotowe instalacje fermentacji suchej są w większości instalacjami pilotażowymi bądź doświadczalnymi (Krajowy Plan Rozwoju Mikroinstalacji, 2013).

Do fermentowania substratów pompowalnych, najczęściej stosuje się metody przepływu tłokowego oraz przepływu pełnego (z idealnym mieszaniem) (Krajowy Plan Rozwoju Mikroinstalacji, 2013). Biogazownie z przepływem tłokowym, nazywane także zbiornikowymi instalacjami przepływowymi, wykorzystują efekt wyporu doprowadzanego świeżego substratu, aby wywołać przepływ tłokowy przez zazwyczaj poziomy fermentator, o przekroju kołowym bądź prostokątnym. Zjawisko przepływu w poprzek kierunku strumienia jest najczęściej realizowane za pomocą wałów łopatkowych, albo specjalnie skonstruowa-

nego przewodu przepływowego. Maksymalne pojemności takich fermentatorów wynoszą ok. 800 m³ (Krajowy Plan Rozwoju Mikroinstalacji, 2013).

Reaktory z idealnym mieszaniem budowane są w formie cylindrycznej. Mają zastosowanie przede wszystkim do wytwarzania biogazu w gospodarstwach rolnych. Pod względem konstrukcyjnym odpowiadają one standardowym zbiornikom na gnojowicę, które można po przeróbkach przystosować do produkcji biogazu. Fermentatory takie składają się ze zbiornika z betonowym dnem i stalowymi lub żelbetowymi ściankami. Zbiornik taki może być całkowicie lub częściowo wpuszczony w podłoże i ma nadbudowane gazoszczelne przykrycie. Idealny przepływ substratu zapewnia mieszałko, ewentualnie system pomp. Maksymalna pojemność tego typu fermentatorów to 6000 m³ (Krajowy Plan Rozwoju Mikroinstalacji, 2013).

Technologia pozyskiwania biogazu w drodze fermentacji suchej może stać się alternatywna dla przedsiębiorstw rolnych, które nie mają do dyspozycji gnojowicy służącej jako substrat podstawowy. Pozyskiwanie biogazu w drodze fermentacji mokrej wiąże się wtedy z wysokimi nakładami technologicznymi, związanymi z koniecznością upłynnienia substratów lub sporządzenia zacieru przy wysokim zużyciu energii i wody.

4. FERMENTACJA METANOWA

4.1. Czynniki wpływające na przebieg fermentacji metanowej

Przebieg procesu fermentacji metanowej zależy od całego szeregu czynników fizycznych i chemicznych, które wpływają na wydajność i skład biogazu. Ważniejsze z nich to: początkowy skład substancji organicznej, jej wilgotność, postać wsadu (stała, ciekła, półciekła), temperatura, ciśnienie oraz rodzaj zastosowanej technologii fermentacji metanowej. W procesie beztlenowego rozkładu substancji organicznej w komorze fermentacyjnej można wyróżnić cztery fazy:

- hydrolizę – uwodnienia wielocząsteczkowych związków organicznych,
- fazę kwaśną – produkcja kwasów organicznych, alkoholi i aldehydów,
- fazę octanogenną – produkcja lotnych kwasów tłuszczowych,
- fazę metanogenną – rozkład lotnych kwasów tłuszczowych do CH_4 i CO_2 .

Bakterie wykazujące aktywność w poszczególnych wymienionych fazach procesu posiadają różne wymagania, co do swoich warunków życia. W przypadku stosowania instalacji jednozakresowych (wszystkie fazy przebiegają w jednym fermentatorze) konieczny jest odpowiedni kompromis. Ponieważ bakterie metanowe są najbardziej wrażliwe na zakłócenia i namnażają się bardzo wolno, warunki środowiska w tym przypadku muszą być do nich dostosowywane. Lepsze pod względem optymalizacji warunków zewnętrznych dla określonych grup bakterii są tzw. technologie dwuetapowe.

Właściwy przebieg fermentacji metanowej, zapewniający wysoką wydajność produkcji metanu, wymaga utrzymania określonych parametrów procesu, które zostały przedstawione poniżej (Boyce, 1991):

Atmosfera beztlenowa

Proces fermentacji metanowej powinien przebiegać w warunkach beztlenowych. Często nie da się jednak uniknąć całkowitego wyeliminowania tego gazu z bioreaktora (fermentatora). Niektóre z bakterii metanowych są warunkowo beztlenowe, czyli mogą przeżyć zarówno w warunkach aerobowych i anaerobowych. Bakterie te zużywając tlen do momentu, gdy jego odprowadzanie będzie odpowiednio wydajne, zapewniają ochronę bakteriom, które mogą żyć tylko w warunkach beztlenowych (Głodek i in., 2007).

Temperatura

Każdy gatunek bakterii biorący udział w procesach przemiany materii wymaga innej temperatury. Procesy metanogenne zachodzą w przyrodzie w temperaturze od 4 do 98°C (Brown, 1996). W przypadku produkcji biogazu, optymalne zakresy temperatur przedstawiają się następująco:

- 20-25°C zakres aktywności bakterii psychrofilnych,

- 35-38°C zakres aktywności bakterii mezofilowych,
- 55-60°C zakres aktywności bakterii termofilowych.

Większość znanych bakterii metanowych, to bakterie mezofilowe. W związku z tym, instalacje pracujące w zakresie mezofilowym są w praktyce najbardziej rozpowszechnione. Osiąga się wówczas najkorzystniejsze uzyski gazu przy zachowaniu dobrej stabilności procesu. Bakterie termofilowe są bardziej wydajne niż mezofilowe, bowiem w ciągu 12 dni mineralizują tyle substancji, ile bakterie mezofilowe w ciągu 21 dni, dzięki czemu, przy tej samej dziennej produkcji biogazu, pojemność zbiorników fermentacyjnych może być znacznie mniejsza. Jednak ze względu na konieczność utrzymywania wyższej temperatury substancji fermentującej, zużycie ciepła przy bakteriach termofilowych jest znacznie większe. Przy niskiej temperaturze otoczenia i niedostatecznej izolacji zbiornika, zapotrzebowanie energii do podgrzewania wsadu fermentatora może być tak duże, że cały wyprodukowany gaz może jej nie zabezpieczyć. Proces termofilowej fermentacji metanowej jest ponadto bardziej czuły na wszelkie zakłócenia (Dreszer i in., 2003). Ma on jednak zastosowanie, gdy zachodzi konieczność stosowania higienizowania, w celu redukcji bakterii chorobotwórczych lub w przypadku stosowania podłoży o wysokiej temperaturze własnej.

Jedną z podstawowych przyczyn zakłócenia procesu fermentacji metanowej jest spadek temperatury poniżej właściwego zakresu, spowodowany awarią układu ogrzewania reaktora, usterką czujników temperatury lub podaniem większej ilości niedogrzanego podłoża. Spadek temperatury hamuje aktywność bakterii metanowych, które przeżywają tylko w ściśle ograniczonym zakresie temperatur. Bakterie hydrolizujące i octowe nie są tak wrażliwe na wahania temperatury i mogą przeżyć przy niższej temperaturze. Z tego powodu w fermentatorze dochodzi do nagromadzenia kwasów i spadku wartości pH.

Odczyn (wartość pH)

Optymalna wartość pH dla bakterii hydrolizujących i kwasotwórczych wynosi 4,5-6,3 natomiast w przypadku bakterii produkujących kwas octowy i metan wartość pH musi mieścić się w granicach 6,8-7,5. Obniżenie wartości pH prowadzi do zahamowania aktywności bakterii metanowych. Rozkład metanogenny nie działa wtedy odpowiednio sprawnie, dochodzi do skupienia kwasów związanych z fermentacją octową, co powoduje jeszcze większe obniżenie wartości pH. W efekcie następuje zakwaszenie wsadu i zahamowanie aktywności bakterii.

Składniki pokarmowe

Konieczne jest zapewnienie bakteriom niezbędnych do wzrostu i przetrwania składników pokarmowych i pierwiastków śladowych, takich jak żelazo, nikiel, kobalt, selen, molibden i wolfram (Braun, 1982).

Ostateczna ilość metanu możliwa do uzyskania z używanych podłoży jest określona poprzez zawartość białek, węglowodanów i tłuszczów. Przykładowo, z 1 kg suchej masy organicznej w wyniku anaerobowej fermentacji białka uzyskuje się 0,6 do 0,7 m³ biogazu, w przypadku węglowodanów jest to 0,8-0,9 m³, a tłuszczy - od 1,2 do 1,5 m³ (Dreszer i in., 2003).

Ponadto o stabilnym przebiegu procesu decyduje również stosunek C/N w używanym podłożu. Jeśli ten stosunek jest za wysoki, nie może uzyskać całkowitej przemiany węgla, a tym samym nie można uzyskać właściwej wydajności procesu. W odwrotnym przypadku, przy nadmiarze azotu, może dojść do powstania amoniaku (NH_3), który już w niewielkich stężeniach hamuje wzrost bakterii i może doprowadzić nawet do zniszczenia całej populacji (Braun, 1982). Aby bakterie otrzymywały dostateczną porcję substancji pokarmowych, stosunek C:N:P:S powinien wynosić 600:15:5:1 (Weiland, 2001).

Inhibitory

Są to substancje, które już w niewielkich ilościach działają toksycznie na bakterie i zakłócają proces rozkładu. Można je podzielić na te, które mogą dostawać się do komory fermentacyjnej razem z substratem oraz na powstające jako produkty pośrednie w poszczególnych etapach rozkładu. Szczególnie szkodliwe substancje to: antybiotyki, środki dezynfekujące, rozpuszczalniki, środki chwastobójcze, sole i metale ciężkie. W przypadku niektórych inhibitorów można mówić o wzajemnym oddziaływaniu z innymi substancjami. Metale ciężkie wpływają niekorzystnie na proces fermentacji tylko wtedy, gdy występują w wolnej postaci. Są one neutralizowane poprzez powstający w procesie fermentacji siarkowodor. Siarkowodor wprawdzie neutralizuje metale ciężkie, lecz przy stężeniu powyżej $50 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ może zahamować proces rozkładu. Ponadto powoduje przyspieszoną korozję instalacji.

Powstający podczas fermentacji amoniak, może także działać hamująco na proces fermentacji. Amoniak dla większości bakterii jest źródłem azotu, lecz już przy niewielkich stężeniach (od $0,15 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$) działa hamująco na rozwój mikroorganizmów. Ilość powstającego amoniaku wzrasta wraz ze wzrostem wartości pH. Rodzaj podłoża także decyduje o tworzeniu się amoniaku – podłoża o wysokiej zawartości białka uwalniają zdwojoną ilość azotu amonowego (Jędrzak, 2007).

Proces mieszania

Mieszanie zapewnia dobry kontakt bakterii i podłoża, ujednolica temperaturę wsadu bioreaktora

i pozwala na równomierne rozproszczenie mikroorganizmów w całej masie. Brak mieszania zawartości fermentatora skutkuje rozwarstwieniem fermentującego substratu. Zjawisko to spowodowane jest różnicą gęstości poszczególnych substancji składowych podłoża. Dochodzi do ograniczenia kontaktu między podłożem a bakteriami, które jako cięższe gromadzą się w dolnej części komory fermentacyjnej. Dodatkowo z substancji, które unoszą się na powierzchni powstaje warstwa utrudniająca przepuszczanie gazów.

Zbyt szybkie mieszanie może również doprowadzić do zahamowania procesu produkcji biogazu. Bakterie octowe i metanowe tworzą zwarte skupiska, które mają duże znaczenie w prawidłowym przebiegu procesu. Jeśli poprzez zbyt intensywne mieszanie naruszy się te skupiska, w najgorszym wypadku prowadzi to do całkowitego zahamowania całego procesu. Stosowane są więc wolnoobrotowe mieszadła, a proces mieszania przeprowadza się okresowo (Dreszer i in., 2003; Głodek i in., 2007).

Do produkcji biogazu można wykorzystać wiele rodzajów substratów. Praktycznie substratem może być każda substancja organiczna, która nie zawiera inhibitorów. Ze względu na rodzaj substratu (podłoża) wykorzystywanego do wytwarzania biogazu można wyróżnić: źródła zwierzęce (gnojowica, obornik), źródła pochodzące z produkcji roślinnej (uprawy energetyczne, odpady zielone), źródła komunalne (odpady organiczne, osad ściekowy), źródła pochodzące z przemysłu spożywczego (odpad z mleczarni, browaru, cukrowni, rzeźni) (Lewandowski, 2006). Zasadą jest sporządzanie mieszaniny substratów, w taki sposób, aby uzyskać konieczne uwodnienie masy fermentacyjnej (w technologii mokrej) oraz wzbogacenie procesu substratami o wyższej wydajności produkcji biogazu, niż szeroko dostępne odpady pochodzące z chowu zwierząt inwentarskich. Z tych względów, dla zapewnienia dużej wydajności procesu produkcji biogazu z substratów odpadowych (produkcji rolniczej, spożywczej), gnojowicę, gnojówkę, wywary przemysłu spożywczego wzbogaca się substratem z roślin energetycznych lub odpadami zawierającymi tłuszcze (odpady poubojowe).

Jakość podłoża ma duży wpływ na ilość i jakość produkowanego biogazu, dlatego niekiedy wymaga ono odpowiedniej obróbki wstępnej, polegającej np. na rozdrobnieniu (siano, resztki poźniwne), usunięciu substancji obcych (kamienie, elementy metalowe, plastik, piasek, drewno itp.). Poprzez rozdrobnienie zwiększa się powierzchnia właściwa podłoża, przez co bakterie mogą szybciej przeprowadzić proces rozkładu. Usuwanie substancji obcych zabezpiecza instalację przed uszkodzeniami.

Oprócz jakości podłoża, parametrem decydującym o ilości powstającego biogazu jest obciążenie objętościowe komory bioreaktora. Obciążenie komory ma zasadniczy wpływ na przebieg procesu fermentacji i produkcję biogazu. Przy zwiększaniu ładunku do wartości granicznej zwiększa się produkcja biogazu. Po osiągnięciu maksimum produkcja maleje, gdyż następuje przeciążenie układu. Konieczne jest więc rozpoznanie optymalnego zakresu obciążenia komory fermentacyjnej (Kaltschmitt i Hartmann, 2001).

Przy ustalaniu wielkości zbiornika bioreaktora należy wziąć pod uwagę hydrauliczny czas aktywności HRT (hydraulic retention time) (Braun, 1982). Parametr ten określa czas, w jakim podane podłoże pozostaje w fermentatorze. Czas retencji substratu w komorze fermentacyjnej musi być dostosowany do rodzaju wsadu, aby zapewnić jego pełny rozkład. Różne substancje ulegają rozkładowi w różnym tempie. Tłuszcze rozkładają się szybciej, dlatego też wsad, w którym one przeważają wymaga krótszego czasu retencji. Substrat z dużą zawartością celulozy wymaga natomiast dłuższego czasu retencji, gdyż celuloza rozkłada się dość wolno. Dla gnojowicy bydlęcej czas retencji wynosi 12-18 dni, dla obornika 18-36 dni, a dla gnojowicy świńskiej 10-15 dni. Czas retencji uzależniony jest także od temperatury, w jakiej przebiega fermentacja metanowa. W warunkach mezofilnych substancje rozkładane są wolniej, a czas retencji trwa 12 do 36 dni. W przypadku fermentacji termofilnej czas ten jest krótszy i wynosi 12 do 14 dni (Głodek i in., 2007).

4.2. Surowce wykorzystywane w biogazowniach rolniczych

Podstawową biomasą uprawianą na plantacjach energetycznych wykorzystywaną jako wsad w biogazowniach rolniczych jest kukurydza przeznaczona na kiszonkę (tab. 4.2.1). W okresie wegetacji, po rozdrobnieniu, może być stosowana bezpośrednio jako wsad do fermentatora. Dla zapewnienia ciągu technologicznego funkcjonowania biogazowi

niezbędne jest zakonserwowanie biomasy poprzez zakiszenie. Plony kukurydzy zbierane z hektara są różne, ale średnio wynoszą 70 t świeżej masy. Hodowla kukurydzy ukierunkowana jest między innymi na selekcję odmian gwarantujących lepszy uzysk biogazu z 1 ha i większą produkcję gazu na kg substratu. Odmiany te powinny być odpowiednio wczesne, tak, żeby w latach chłodnych można osiągnąć 30% s.m. Zapobiega się wówczas stratom spowodowanym wyciekaniem soku podczas zakiszania i nieproduktywnemu transportowi wody. Przechowywanie kiszonki kukurydzy odbywa się w silosie przejazdowym pod przykryciem foli plastikowej. Po zakończeniu fazy kiszenia (od 4 do 6 tygodni) kiszanka nadaje się bezpośrednio do użytku w instalacji biogazowej. W produkcji kiszonek ważny jest właściwy czas zbioru, który powinien być przeprowadzony przy zawartości suchej masy 28-30%. Mniejsza zawartość suchej masy przyczynia się do zwiększonych strat w gospodarce wodą, a większa uniemożliwia prawidłowe ugniecenie. Istotna dla procesu kiszenia i przebiegu fermentacji jest również długość siewki (4-6 mm) oraz warstwowe ugniecenie. Wyboru odmian do produkcji biogazu dokonuje się uwzględniając produkcję wysokich plonów suchej masy na określonym stanowisku. Zalecenia uprawowe dla kukurydzy w wilgotnych i chłodnych warunkach Polski do produkcji biogazu to: zwiększona obsada (+10%), opóźniony siew zgodny z miejscowymi warunkami, dobór odmian wczesnych, tolerancyjnych na chłód, stabilnych.

Tabela 4.2.1. Charakterystyka wsadu z kukurydzy

Rodzaj odpadów	Zawartość wody (%)	Zawartość substancji organicznej (% s.m.)	Zawartość azotu (% s.m.)	Iloraz C/N	Produkcja biogazu (m ³ (kg s.m.o) ⁻¹)	Zawartość metanu w gazie (%)
Kukurydza	65-75	—	—	—	0,61-0,64	53
Kaczany	9-18	85-95	0,4-0,8	56-123	—	—
Łodygi	12	—	0,6-0,8	60-73	0,45	Ok. 80
Kiszanka kukurydzy	65-80	85-95	1,1-2,0	10-25	0,45-0,70	50-55

Źródło: Jędrczak, 2007

Struktura użytkowania gruntów zmienia się z różnych powodów. Zmniejsza się również pogłowie zwierząt gospodarskich. Nie każdy użytek zielony nadaje się do zmiany użytkowania na grunty orne. Przy braku możliwości spasaniania traw pozostaje problem zagospodarowania biomasy z użytków zielonych. Prosty sposób, w pewnym stopniu niezależnym od warunków pogodowych, jest przygotowanie sianokiszonek. Ilość biomasy i wydajność biogazowa uzasadnia uwzględnienie tego substratu w procesie fermentacji metanowej.

Ze względu na dopłaty do poplonów, ale również strukturotwórcze i ochronne znaczenie dla gleby, rolnicy są zainteresowani uprawą poplonów z roślin motylkowatych. Część tej biomasy wytwarzanej w gospodarstwie może być ważna pod względem komponentów do fermentacji, ze względu na możliwość korekty stosunku składników, w tym głównie C:N.

Perspektywy rozwoju rynku biogazowego to również produkcja wyselekcjonowanych roślin tzw. energetycznych w systemie rotacyjnym, bez konkurencji z uprawami na cele produkcji żywności i pasz. Są to między innymi miskant olbrzymi, ślazier pensylwański, oraz topinambur. Rośliny te budzą zainteresowanie ze względu na wydajność biomasy z hektara oraz porównywalną do kukurydzy wydajność biogazową z jednostki masy. Prowadzone szeroko w wielu krajach badania pozwolą wkrótce odpowiedzieć, które z upraw przeznaczonych na biogaz są optymalne na danym stanowisku pod względem ekonomicznym i ekologicznym, biorąc pod uwagę indywidualne uwarunkowania gospodarstw. W przypadku nowych, alternatywnych upraw z przeznaczeniem na produkcję biogazu, zapoczątkowana została hodowla odmian specjalnie przystosowanych do tego typu produkcji. Kompromisowym rozwiązaniem jest uprawa tradycyjnych odmian tych gatunków i wykorzystanie do produkcji biogazu kiszonki z całych roślin.

Nawozy naturalne

Gnojówka jest nawozem jednorodnym powstałym z przefermentowanego moczu zwierzęcego gromadzonego w zbiornikach (pozbawionym fosforu). Związki azotu przekształcają się w formy mineralne, dlatego jest stosowana, jako naturalny nawóz azotowo-potasowy. Ilość gnojówki stosowana na użytkach zielonych waha się w granicach $10-20 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$. Skład chemiczny gnojówki: 1-3% suchej masy, 0,3-0,6% N; 0,68-0,83% K; < 0,04% P.

Obornik nawóz naturalny zawierający składniki odżywcze konieczne do rozwoju roślin, poprawy jakości i właściwości fizycznych gleby. Składa się z przefermentowanego kału, moczu zwierzęcego i ściółki.

W zależności od gatunku czy chowu zwierząt (chów bezściółkowy, wysoko ściółkowy) obornik możemy podzielić na:

- świeży – nie poddany fermentacji, o niejednolitej strukturze i szerokim stosunku C:N,
- przefermentowany – poddany fermentacji przez 4-5 mies.; następuje częściowa mineralizacja materii organicznej i zawężenie stosunku C:N,
- słomiasty – zawierający dużo ściółki ze słomy i odznaczający się szerokim stosunkiem C:N,
- kompostowany – o dużym stopniu rozkładu,
- drobiowy – zwany pomiotem ptasim, jest to nawóz będący mieszaniną wydaliny hodowanego drobiu i ściółki. W jego zawartości mogą znaleźć się też środki hamujące wydzielanie amoniaku.

Gnojowica powstaje z odchodów zwierzęcych ciekłych i stałych oraz niewielkiej domieszki wody. Ma płynną konsystencję, głównie składa się z przefermentowanej mieszaniny kału i moczu zwierząt gospodarskich, z ewentualną domieszką wody pochodzącej z procesów technologicznych np. pojenie, oraz niewykorzystanych pasz. Gnojowica gromadzona w zbiornikach pochodzi z obór bezściółkowych, często zastępowana jest obornikiem. Ze względu na stopień rozcieńczenia wyróżnia się gnojowicę:

- gęstą >8% suchej masy,
- rzadką <8% suchej masy.

Sucha masa zawarta w oborniku i gnojowicy pochodzenia zwierzęcego zawiera organiczne związki węgla. Biogazownie mogą przetwarzać odchody pochodzenia zwierzęcego wraz z innymi odpadami organicznymi pochodzącymi z przemysłu spożywczego. Przy

procesie fermentacji najczęściej stosowane są dwa zakresy temperatur 35-40°C (czas retencji 20 dni) i 55-65°C (czas retencji 14 dni).

Wyraźnie niższa średnia zawartość metanu w gazie z gnojowicy bydłowej jest wynikiem częściowej fermentacji materii organicznej w żołądkach bydła (Jędrczak, 2007) (tab. 4.2.2).

Tabela 4.2.2. Charakterystyka odchodów zwierzęcych

Rodzaj odpadów	Zawartość wody (%)	Zawartość substancji organicznej (% s.m.)	Zawartość azotu (% s.m.)	Iloraz C/N	Produkcja biogazu (m ³ kg s.m.o ⁻¹)	Zawartość metanu w gazie (%)
Gnojowica						
trzoda	90-97	70-86	6-18	3-10	0,30-0,70	60-80
bydło	88-95	75-85	2,6-6,7	6-20	0,20-0,50	55-75
Odchody kurze	70-90	57-80	5,4	3-10	0,25-0,60	60
Obornik	60-90	65-95	1,3-4,3	11-50	0,17-0,35	60
trzoda	65-90	75-80	1,9-4,3	9-19	0,27-0,45	70-80
bydło	67-87	68-76	1,5-4,2	11-30	0,21-0,30	60
konie	60-80	65-95	1,4-2,3	22-50	0,20-0,35	–
owce	60-75	65-95	1,3-3,9	13-20	0,09-0,31	–

Źródło: Jędrczak, 2007

Płynna postać gnojowicy sprawia, że odpad ten doskonale nadaje się jako wsad do fermentacji metanowej. Żeby proces stał się bardziej efektywny, wsad uzupełnia się różnymi substancjami organicznymi (kosubstratami) pochodzącymi z przemysłu spożywczego, produkcji roślinnej, zwierzęcej, a także biomasą. Tabela 4.2.3 przedstawia ilość gazu uzyskaną w procesie beztlenowego rozkładu gnojowicy kształtującą się w granicy od 0,17-2,13 m³ na sztukę hodowlaną na dobę.

Zastosowanie kosubstratów umożliwia właściwe obciążenie komory fermentacyjnej, optymalizuje kinetykę procesu fermentacji metanowej, poprzez lepszą konfigurację proporcji węgla do azotu. Podnosi efektywność procesu i jego opłacalność ekonomiczną (Rozporządzenie Ministra, 2002).

Tabela 4.2.3. Ilość gazu uzyskana w temp. 38°C z odchodów w zależności od rodzaju i masy zwierząt gospodarskich

Rodzaj zwierząt	Masa, (kg)	Produkcja gazu (m ³ ·(szt.·d) ⁻¹)
Trzoda chlewna	65	0,17
Krowy mleczne	600	2,13
Bukaty	350	0,93
Kury nioski	2	0,012

Źródło: Jędrczak, 2007

Odpady pochodzenia zwierzęcego mogą być wykorzystane do przetwarzania, jeżeli spełniają wymagania zawarte w rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego i Rady 1774/2002/WE, wprowadzającego przepisy zdrowotne odnoszące się do produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego, nieprzeznaczonych do spożycia przez ludzi (Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady 1774/2002/W, 2002).

Odpady organiczne z przemysłu spożywczego

Odpady organiczne z przemysłu spożywczego charakteryzują się różnorodnością składu chemicznego, ponieważ pochodzą z różnych gałęzi przemysłu spożywczego. Ich pochodzenie sprawia, że są narażone na zanieczyszczenia takie jak szkło, tworzywo sztuczne, i inne obce substancje. Są bogate w białka, węglowodany, tłuszcze i szereg różnych związków, które przyspieszają lub opóźniają proces fermentacji beztlenowej. Charakteryzują się wilgotnością rzędu od 10-95%. Tłuszcze zapewniają największą produkcję biogazu, ale jednocześnie w wyniku niskiej podatności na biodegradację, wymagają najdłuższego czasu zatrzymywania w komorze (Jędrzak, 2007). Najwyższą podatność na rozkład mają węglowodany i białka, ale w procesie fermentacji produkuje się mniej metanu (Jędrzak i in., 2001).

Odpady organiczne posiadają wysoki potencjał energetyczny, co sprawia, że są tanim surowcem dla biogazowni. Wszelkiego rodzaju odpady z mleczarni, przetwórnictwa warzyw i owoców, wysłodziny gorzelnicze, cukrownicze, resztki poubojowe (krew, resztki tłuszczowe, odpady rybne), według przepisów prawnych są zaliczane do grupy surowców niebezpiecznych są znakomitym surowcem do fermentacji beztlenowej.

Bioodpady

Bioodpady należą do grupy odpadów gnilnych o strukturze mokrej, które ulegają biodegradacji, czyli rozkładowi pod wpływem naturalnych czynników takich jak światło, tlen, woda i udział związków organicznych.

W ich skład wchodzi odpady pochodzące z:

- parków i ogrodów zawierające od 50 do 60% wilgoci,
- gospodarstw domowych,
- kuchni i restauracji zawierające do 80% wilgoci,
- handlu detalicznego,
- zakładów przetwórstwa spożywczego.

Do bioodpadów nie kwalifikują się odpady pochodzenia rolniczego (osady ściekowe, odchody zwierzęce), leśnego oraz wszelkiego rodzaju włókna naturalne, papiery, tektury oraz produkty uboczne produkcji żywności.

4.3. Jakość i ilość biogazu uzyskiwanego w procesie fermentacji

O prawidłowym przebiegu fermentacji, poza właściwym substratem, decydują odpowiednie populacje mikroorganizmów oraz parametry środowiskowe, wpływające na ich aktywność i szybkość przemian, tj. pH, wymiar cząsteczek, temperatura, siła jonowa (zasolenie) oraz stężenie składników pokarmowych i związków toksycznych.

W procesie beztlenowego przekształcania substancji organicznych w gaz fermentacyjny biorą udział trzy grupy mikroorganizmów: bakterie kwasotwórcze, bakterie octanowe i bakterie metanogenne. W pierwszych dwóch fazach dominują bakterie będące zarówno obligatoryjnymi (*Bacillus*, *Pseudomonas*, *Clostridium*, *Bifidobacterium*), jak i fakultatywnymi beztlenowcami (*Streptococcus*, *Enterobacterium*). Niektóre z bakterii kwasotwórczych są bezwzględnie beztlenowcami (*Aerobaeter*, *Alcaligenes*, *Clostridium*, *Escherichia*, *Lactobacillus*, *Micrococcus* czy *Flavobacterium*) (Nimmrichter, Kuebler, 1999). Ich liczebność w procesie fermentacji mezofilowej szacuje się na 108-109 w 1 ml (Kaltschmitt, Hartmann, 2001). Szybkość wzrostu bakterii w obu tych fazach waha się od 5 godz. w obecności węglowodanów do 72 godz. podczas rozkładu tłuszczów (Heidrich, Nieścier, 1999).

W laboratorium biogazowym Wydziału Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie zostały przeprowadzone badania nad jakością i ilością wydzielanego biogazu z frakcji pochodzenia rolniczego. Fermentacje, w których wsad był wykonany jako miks wielu frakcji charakteryzowały się większą wydajnością biometanową niż wsady wykonane z monosubstratów.

Określenie intensywności wydzielania biogazu w wybranych wsadach przeprowadzono zgodnie z normą DIN 38414-S8. Podłoża wsadowe fermentowane były w warunkach statycznych, polegających na jednorazowym wprowadzeniu frakcji do komór fermentacyjnych i prowadzeniu procesu aż do zakończenia fermentacji.

Frakcje zostały rozdrobnione, następnie z każdej zostało pobrane pięć próbek. Próbkę zostały zważone w celu określenia ich masy przed wysuszeniem. Pomiar masy przeprowadzony został na wadze elektronicznej WPE 300. Urządzenie to cechuje się dokładnością $\pm 0,01$ g. Do suszenia została wykorzystana konwekcyjna suszarka laboratoryjna z wymuszonym obiegiem powietrza Elkon 110.

Rozdrobniony materiał został uwodniony do wilgotności około 90%, tworząc optymalne warunki do rozwoju bakterii mezofilnych. Z przyjętych do badań frakcji wykonano dziewięć wsadów o parametrach przedstawionych w tabeli 4.3.1. Wsady dla których określano wykorzystanie energetyczne pofermentu zostały uwodnione i wprowadzone do komory fermentacyjnej o pojemności 20 dm³ i regulowanym środowisku temperaturowym. Dziesięciokrotne zwiększenie komory powoduje, że otrzymuje się taką ilość pofermentu na którym można wykonać badania przydatności energetycznej. W fermentorze tym było monitorowane pH, redoks oraz temperatura wsadu. Wytwarzany biogaz gromadzony był w zbiorniku o zmiennej pojemności. Schemat stanowiska z komorą o pojemności 20 dm³ przedstawiono na rysunku 4.3.1.

Tabela 4.3.1. Parametry wybranych wsadów do komór fermentacyjnych

Nr	Nazwa materiału	pH A	pH B	% s.m.
Wsad 1	Wywar pogorzelniany zbożowy	4,16	5,23	7,25
Wsad 2	Wywar pogorzelniany zbożowy	3,99	5,15	7,94
Wsad 3	Kiszonka z wysłodków buraczanych	4,45	5,23	26,28
Wsad 4	Makuchy rzepakowe z produkcji biopaliwa	5,31	5,36	67,25
Wsad 5	Wytłoki jabłek	4,26	4,59	21,56
Wsad 6	Młoto browarniane świeże (mokre)	5,64	5,01	29,64
Wsad 7	Kiszonka z kukurydzy zebrana sieczkarnią połową bez zgniatacza ziarna	5,23	4,86	46,42
Wsad 8	Kiszonka z kukurydzy zebrana sieczkarnią ze zgniataczem ziarna	4,46	4,71	44,65
Wsad 9	Celuloza z przemysłu papierniczego	7,35	7,43	65,37

A – wsad; B – poferment

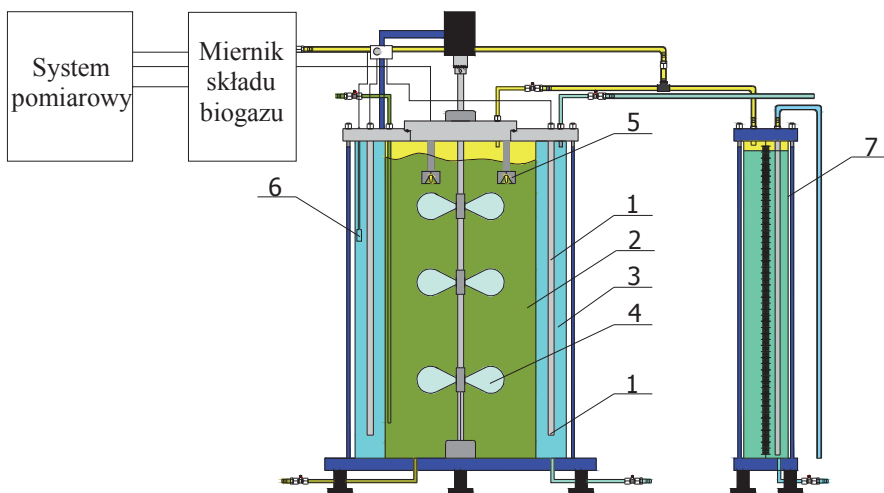
Źródło: Sikora i in., 2013

Wykonane wsady zostały umieszczone w komorze (2), w której za pomocą sond (5) są monitorowane parametry fermentacji takie jak: temperatura, redoks i pH. Parametry te są automatycznie zapisywane z interwałem czasowym na twardym dysku komputera systemu pomiarowego. W komorze podłoże było mieszane mieszadłem mechanicznym (4) w celu uniknięcia rozwarstwienia. Mieszadło posiada możliwość płynnej regulacji w zakresie od 0 do 400 obr. $\cdot$ min⁻¹, jest wyposażone w trzy śmigła o regulowanym rozstawie, co umożliwia zmianę intensywności stref mieszania w fermentorze.

Komora fermentora jest wyposażona w płaszcz wodny (3), w którym są umieszczone trzy grzałki patronowe (1) odpowiadające za podgrzewanie cieczy. Za sterowanie temperaturą procesu odpowiada układ pomiarowy wyposażony w termometr (6) PT100. Wytworzony biogaz gromadzi się nad powierzchnią wsadu w fermentorze oraz w zbiorniku (7) o zmiennej objętości, z którego jest zasysany przez miernik składu biogazu. Miernik ten analizuje następujące parametry: wilgotność, temperaturę, ciśnienie, metan CH₄, tlen O₂, dwutlenek węgla CO₂ oraz siarkowodór H₂S. Mierzone parametry składu biogazu są automatycznie zapisywane na dysku komputera systemu pomiarowego.

Do określenia ilości i intensywności wydzielania biometanu zastosowano fermentatory o pojemności 2 dm³. Fermentatory zainstalowano w zbiorniku z regulowanym środowiskiem temperaturowym, tworzącym część stanowiska badawczego, zaopatrzonego w odpowiedni układ pomiarowy. Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 4.3.2. Do stelaża (1) znajdującego się obok zbiornika (2) zostały przymocowane urządzenia służące do utrzymania stałego środowiska temperaturowego. Sterowanie odbywało się za pomocą

termostatu elektronicznego ESCO ES-20 (stycznik 16A) z dokładnością do $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ wynikającą z histerezy czujnika. Spadek temperatury o wartość przekraczającą $0,1^{\circ}\text{C}$ powodował włączenie grzałki o mocy 1500 W (3) z jednoczesnym uruchomieniem pompy wodnej Hanning DPO 25-205 (4) w celu zapewnienia równomiernego rozkładu temperaturowego w całej komorze. Po podgrzaniu wody do temperatury przewyższającej zadaną o $0,1^{\circ}\text{C}$ następowało wyłączenie grzałki i z 30-to sekundowym opóźnieniem pompy.



Rysunek 4.3.1. Schemat stanowiska badawczego z fermentorem 20 dm³

Tablicę rozdzielczą (5) stanowiły szeregowo połączone rozdzielacze wraz z zaworami odcinającymi (6) i manometrem (7) mierzącym ciśnienie w poszczególnych gałęziach pomiarowych. Dzięki zastosowaniu takiego układu do obsługi wszystkich fermentatorów wystarczył jeden system pomiarowy. Układ pomiaru objętości (8) składał się z dwóch kolumn wypełnionych wodą z zaworami spustowymi oraz zbiornika do uzupełniania poziomu cieczy w kolumnach (9). Układ pomiarowy został połączony z tablicą rozdzielczą oraz z miernikiem składu biogazu za pomocą przewodu (10), który został przedstawiony na rysunku 4.3.1.

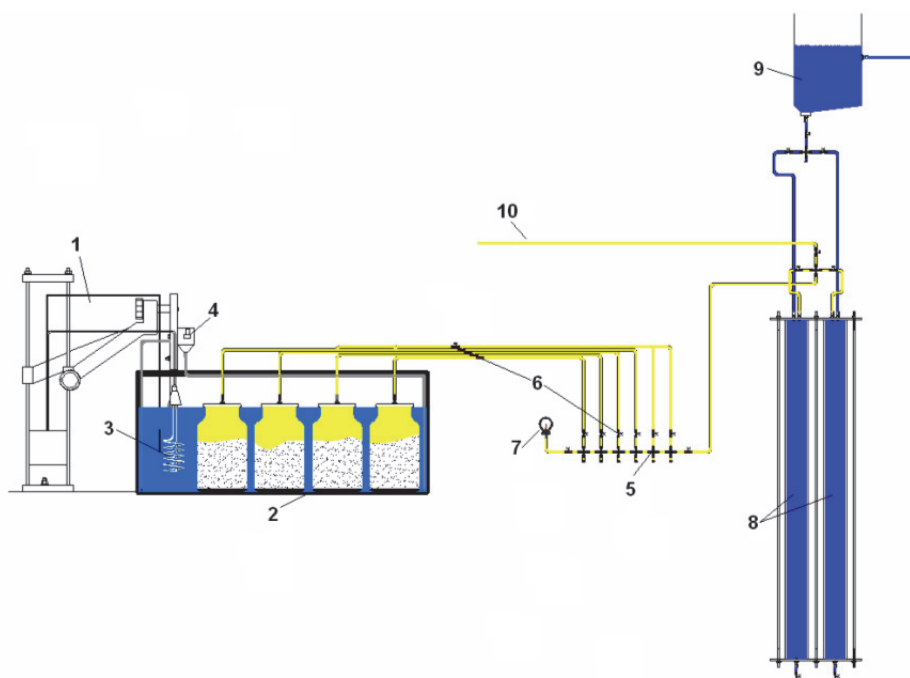
Przed rozpoczęciem fermentacji dla wszystkich badanych wsadów wykonano analizę chemiczną. Oznaczono suchą masę frakcji oraz odczyn. Dla każdego badanego wsadu fermentację prowadzono równolegle. Ilość powstającego gazu odczytywano dwa razy dziennie o tej samej porze.

Przeprowadzone badania procesu fermentacji w warunkach laboratoryjnych pozwoliły na porównanie intensywności wydzielania biogazu, prześledzenie faz fermentacji oraz ocenę podatności badanych mas wsadowych na procesy biochemicznego rozkładu masy organicznej. Parametry badanych frakcji przedstawiono w tabeli 4.3.1. Na rysunku

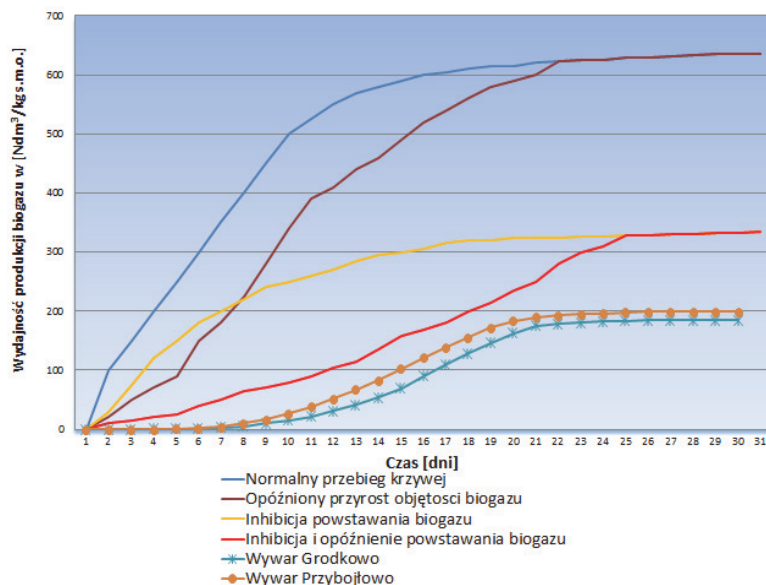
4.3.3.÷4.3.6. przedstawiono sumaryczną ilość wyprodukowanego biogazu oraz intensywność wydzielania biogazu w czasie fermentacji. Ilość i intensywność wydzielania biogazu są parametrami, które świadczą o przebiegu procesu.

Wyniki analizy uzysku biogazu w stosunku do suchej masy wskazały na zdecydowane największą wydajność wsadu 9, przy niskiej wydajności biomasy pochodzącej z PRS (rys. 4.3.3.; 4.3.4.; 4.3.5.). W przebiegu fermentacji wsadów z biomasy z PRS, widoczne opóźnienie przyrostu objętości biogazu, jest spowodowane pasteryzacją masy w której nie ma środowiska mikrobiologicznego i bardzo słabo namnażają się mikroorganizmy fermentacji metanowej. Największa inhibicja przyrostu i opóźnienia powstawania biogazu podczas fermentacji była dla wsadu wykonanego na bazie wywaru pogorzelnianego zbożowego i młóta browarnianego świeżego. Normalny przebieg wydajności produkcji biogazu uzyskano dla wadu 9 i wsadu 8.

Podjęto również próbę wyznaczenia ilości i jakości biogazu z miksów wsadowych wykonanych na frakcjach pochodzenia rolniczego i biomasy z odpadów komunalnych.

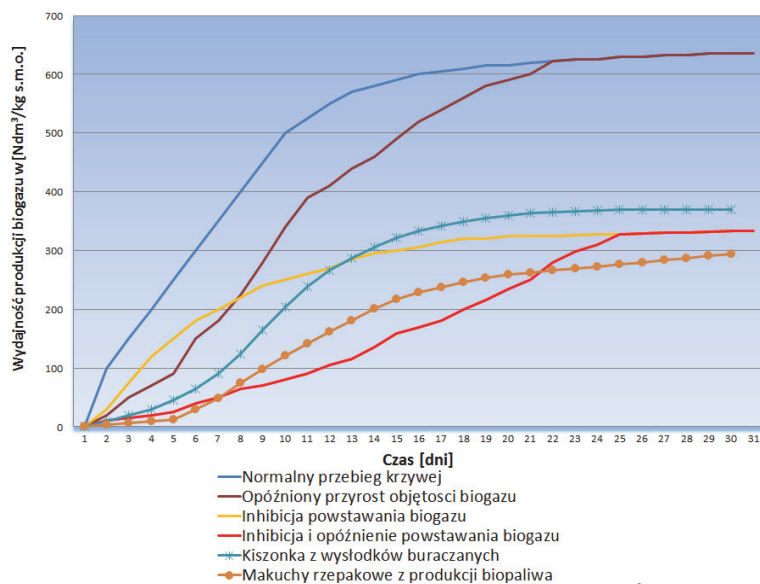


Rysunek 4.3.2. Schemat stanowiska badawczego z fermentorami 2 dm³
(opis w tekście)



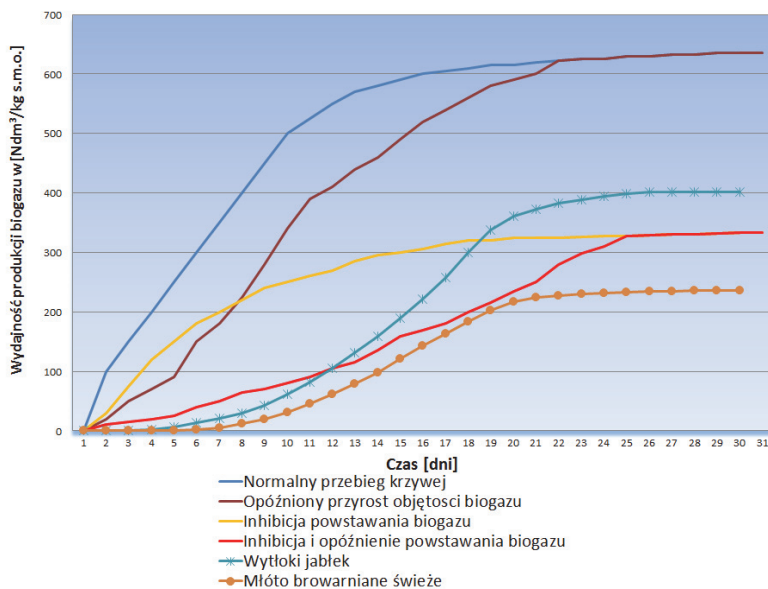
Źródło: Sikora i in., 2013

Rysunek 4.3.3. Wydajność biogazu z wywaru pogorzelnianego



Źródło: Sikora i in., 2013

Rysunek 4.3.4. Wydajność biogazu z kiszonki wysłodków buraczanych, makuch rzepakowych



Źródło: Sikora i in., 2013

Rysunek 4.3.5. Wydajność biogazu z kiszonek kukurydzy i celulozy

Jak już wcześniej wspomniano, istniejące rozwiązania, jako materiał wsadowy do produkcji biogazu w większości przypadków wykorzystują kiszonkę kukurydzianą. Takie podejście może doprowadzić do uprawy monokulturowej. Zaproponowane badania wychodzą naprzeciw tym problemom i mają dać odpowiedź na pytanie jak zaprojektować inwestycje biogazowi, aby z jednej strony była ekonomicznie uzasadniona, a z drugiej wsad do fermentatora był zróżnicowany na tyle, by mieścić się w dobrej kulturze produkcji rolniczej i wykorzystywał biomasę odpadów komunalnych występujących na terenie zasięgu biogazowni.

Do badań przyjęto następujące frakcje:

- a) organiczna masa pochodzenia rolniczego: kiszonka z kukurydzy, gnojowica bydłęca,
- b) organiczna frakcja odpadów komunalnych.

Z przyjętych do badań frakcji wykonano sześć mieszanin wsadów o parametrach przedstawionych w tabeli 4.3.2.

Przeprowadzone badania procesu fermentacji w warunkach laboratoryjnych pozwoliły na porównanie intensywności wydzielania biogazu, prześledzenie faz fermentacji oraz ocenę podatności badanych mikсів wsadowych na procesy biochemicznego rozkładu masy organicznej. Parametry badanych frakcji przedstawiono w tabeli 4.3.3. Na rysunku 4.3.6. i 4.3.7. przedstawiono sumaryczną ilość wyprodukowanego biogazu oraz intensywność wydzielania biogazu w czasie fermentacji.

Tabela 4.3.2. Parametry wsadów do komór fermentacyjnych

Nazwa	Fracje		
	Kiszonka z kukurydzy (%)	Gnojowica bydlęca (%)	Podsitowa frakcja odpadów komunalnych (%)
Wsad 1	65	5	30
Wsad 2	100	0	0
Wsad 3	0	0	100
Wsad 4	50	5	45
Wsad 5	20	5	75
Wsad 6	75	5	20

Źródło: Sikora, 2012

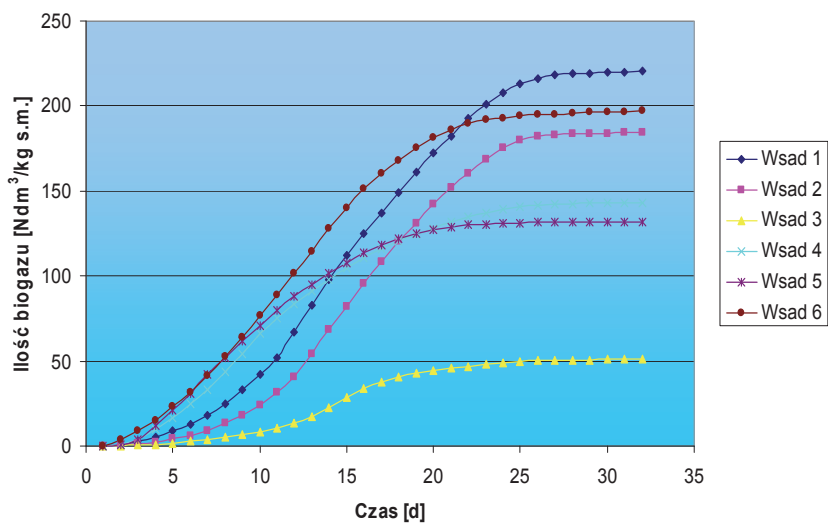
Tabela 4.3.3. Właściwości fizykochemiczne substratów wybranych do badań

Nazwa składnika wsadu	pH (-)	s.m. (%)
Kiszonka z kukurydzy	3,8	26,3
Gnojowica bydlęca	7,5	12,0
Organiczna frakcja odpadów komunalnych	5,8	54,0

Parametry kiszonki z kukurydzy czy organicznej frakcji odpadów komunalnych nie odbiegały od wartości literaturowych. Natomiast gnojowica charakteryzowała się większą, niż podawana w literaturze, zawartością suchej masy, która kształtowała się w granicach 12%. Takie wartości wynikają z technologii zastosowanej na fermie krów mlecznych.

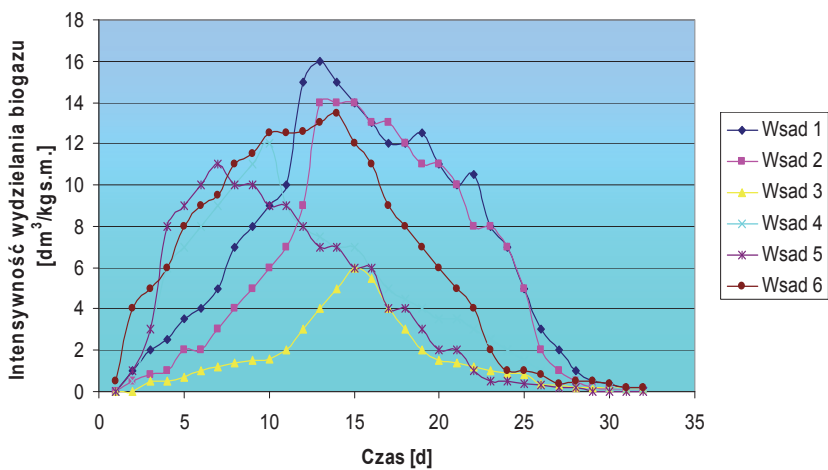
Wyniki analizy uzysku biogazu w stosunku do suchej masy wskazały na zdecydowane największą wydajność wsadu 1 ($223 \text{ Ndm}^3 \cdot \text{kg s.m.}^{-1}$). Przy niskiej wydajności kiszonki z kukurydzy (wsad 2), uzyskano tylko $184 \text{ Ndm}^3 \cdot \text{kg s.m.}^{-1}$ (rys. 4.3.7.). Dla wsadu 2, wykonanego tylko z kiszonki kukurydzy, zaobserwowano opóźnienie przyrostu objętości biogazu, które jest spowodowane niskim odczynem podłoża. Największą inhibicję przyrostu i opóźnienia wydzielania biogazu odnotowano podczas fermentacji organicznej frakcji odpadów komunalnych (wsad 3). Normalny przebieg wydajności produkcji biogazu uzyskano dla wsadu 6 wykonanego z 75% kiszonki kukurydzy, 5% gnojowicy oraz 20% organicznej frakcji odpadów komunalnych.

Badania wykazały poprawę zdolności fermentacyjnej wsadów w kofermentacjach. Zmieszanie frakcji spowodowało zwiększenie intensywności wydzielania biogazu podczas fermentacji. Dla wsadów opartych na kiszonce z kukurydzy w proporcjach 65% i 75% uzyskano największą wydajność biogazu podczas fermentacji.



Źródło: Sikora, 2012

Rysunek 4.3.6. Sumaryczna ilość wydzielonego biogazu



Źródło: Sikora, 2012

Rysunek 4.3.7. Intensywność produkcji biogazu

5. POZYSKANIE BIOMASY

5.1. Biomasa z terenów rolniczych

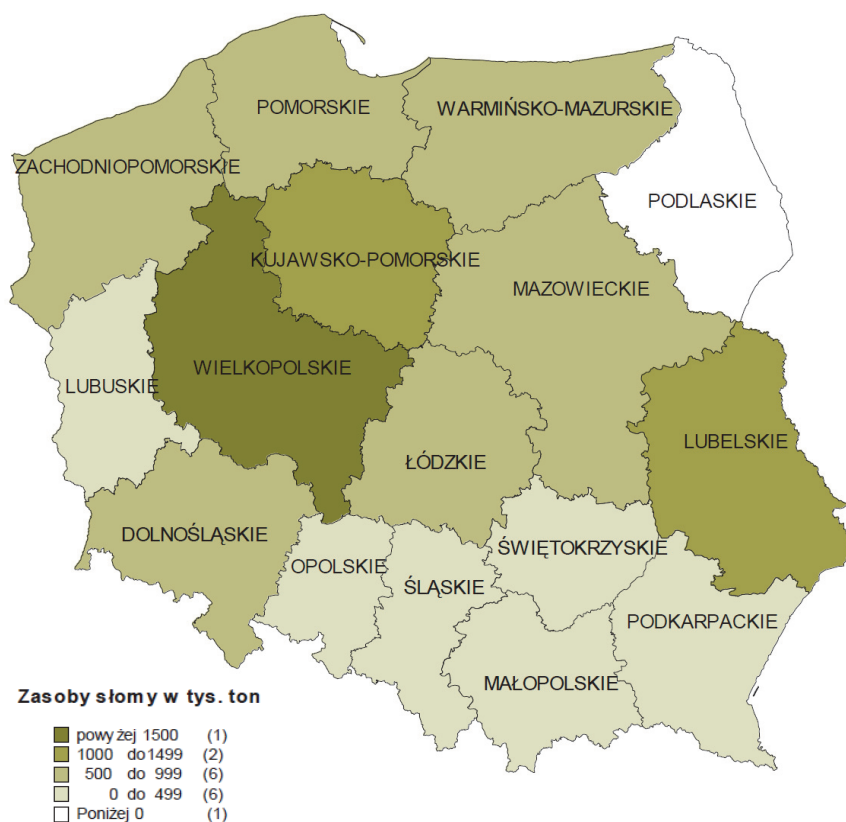
Kierunek dalszego rozwoju wykorzystania biomasy, w szczególności rolnej, zarówno w energetyce zawodowej jak i indywidualnej wydaje się bardzo właściwy. Możliwość zagospodarowania pozostałości rolniczych, takich jak słomy roślin zbożowych czy też strączkowych, pozwala między innymi na podniesienie opłacalności produkcji. Technologie energetycznego wykorzystania surowców rolniczych pozwalają również na zagospodarowanie produktów o obniżonej, często pozaklasowej jakości, dając szansę uzyskania dodatkowego przychodu.

Zmieniająca się struktura produkcji rolniczej jak i stosowane technologie sprawiają, iż zapotrzebowanie na pasze objętościowe (słoma, siano) w produkcji zwierzęcej maleje. W wielu miejscach w Polsce powstają więc nadwyżki produkcji słomy. Wzrasta również areal użytków zielonych, z których pozyskane siano nie jest wykorzystywane do produkcji zwierzęcej. Możliwość wykorzystania wspomnianych surowców w energetyce stwarza stałą lub przynajmniej przejściową (zmiana kierunku produkcji w gospodarstwie) alternatywę w produkcji rolniczej. Obecnie około 20% użytków zielonych jest pozostawionych odłogowaniu lub sukcesywnie ulega przekształceniu w ugory. Jak się szacuje, plon siana możliwy do pozyskania na trwałych użytkach zielonych (TUZ) o klasycznej, dotychczas zalecanej, mieszkanke gatunkowej traw (użytkowanie na cele paszowe) kształtuje się na poziomie $4,7 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ (Jankowska-Huflejt, 2013).

Prowadzone badania oraz analizy wykazały (Terlikowski i in., 2005; Terlikowski, 2012), iż potencjał biomasy z TUZ, możliwy do wykorzystania na cele energetyczne, wynosi ok. 1,82 mln t s.m., o średniej wartości opałowej $14,75 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Odnosząc wartość energetyczną siana do klasycznego nośnika energii jakim jest węgiel kamienny uzyskujemy przelicznik 1 t siana – 0,615 t węgla. Zatem potencjał energetyczny biomasy z TUZ w Polsce można wyrazić ilością ok. 1,12 mln t węgla.

Tak więc wydaje się, iż w krótkiej perspektywie, kierunek energetycznego wykorzystania plonów z TUZ jest bardzo ciekawą alternatywą pozwalającą na utrzymanie tych terenów w odpowiedniej kondycji.

Podobnie możliwość wykorzystania pozostałości (słoma) z produkcji ziarna stwarza szansę na uzyskanie dodatkowego dochodu w produkcji rolnej. Jednak ze względu na potrzeby paszowe oraz glebowe (zaw. próchnicy) potencjał słomy jest bardzo zróżnicowany na terenie kraju (rys. 5.11.) (Gradziuk, 2012). Największe nadwyżki słomy możliwe do energetycznego wykorzystania zlokalizowane są w środkowej Polsce (woj. wielkopolskie, kujawsko-pomorskie), natomiast najmniejsze, graniczące z deficytem, w woj. podlaskim oraz na południu Polski. Tak więc, strategie związane z wykorzystaniem słomy na cele energetyczne powinny być opracowane z uwzględnieniem specyfiki poszczególnych regionów kraju.



Źródło: Gradziuk, 2012

Rysunek 5.1.1. Przestrzenne rozmieszczenie zasobów słomy do energetycznego wykorzystania w latach 1999-2009

Na terenach rolnych oprócz wspomnianej biomasy pochodzącej z pozostałości produkcyjnych, możliwe jest także zakładanie plantacji celowych tzw. energetycznych. Wyniki przeprowadzonych badań przez IUNG w Puławach wskazują, iż do produkcji biomasy można wykorzystywać kilka znanych gatunków roślin. Do najpopularniejszych należą wierzba wiciowa, ślazier pensylwański, miskanty i topinambur. Dobór gatunku rośliny do uprawy energetycznej będzie uzależniony od warunków siedliskowych, przyjętego sposobu zagospodarowania biomasy (spalanie, produkcja biogazu, produkcja gazu drzewnego itp.) oraz kosztów produkcji i transportu. Prowadzone badania, związane z agrotechniką uprawy oraz oceną ilościową roślin energetycznych wykazały, iż realne plony biomasy możliwe do uzyskania w produkcji wielkoobszarowej wynoszą ok. 9-12 t·ha⁻¹ suchej masy (Faber i Kuś, 2007).

W tabeli 5.1.1. przedstawiono porównanie plonów wyrażonych w ($t \cdot ha^{-1}$) suchej masy dla wybranych gatunków roślin uprawianych na cele energetyczne, dla różnych rodzajów gleby.

Tabela 5.1.1. Plony wybranych gatunków roślin energetycznych w doświadczeniach prowadzonych w IUNG w Puławach

Gatunek	Plony ($t \cdot ha^{-1} \cdot s.m.$)				
	2004r.	2005r.	2006r.	2007r.	Średnio
Ciężka czarna gleba (kompleks 8 – zbożowo-pastewny mocny)					
Wierzba – średnio z 4 klonów	14,7	12,8	11,1	12,7	12,8
Miskant – średnio z 5 klonów	10,2	19,2	15,6	15,8	15,2
Ślazieriec – obsada $10 \text{ tys.} \cdot ha^{-1}$	7,4	10,0	10,3	9,3	9,2
Ślazieriec – obsada $20 \text{ tys.} \cdot ha^{-1}$	14,8	20,8	20,4	17,1	18,3
Gleba średnia (kompleks 4 – żytni bardzo dobry)					
Wierzba – średnio z 4 klonów	13,3	10,8	11,5	12,4	12,0
Miskant – średnio z 5 klonów	13,9	20,7	16,7	21,0	18,1
Ślazieriec – obsada 10 tys./ha	6,4	9,0	11,4	9,6	9,1
Gleba lekka (kompleks 5 żytni dobry)					
Wierzba – średnio z 8 klonów	–	10,1	11,9	12,3	11,1
Miskant – średnio z 5 klonów	–	8,5	8,8	–	8,6
Ślazieriec – obsada $20 \text{ tys.} \cdot ha^{-1}$	11,2	20,5	12,9	11,1	13,9
Topinambur (części nadziemne)	7,8	13,2	8,1	–	9,7

Źródło: opracowanie własne na podstawie Faber i In., 2009; Faber i Kuś, 2007

5.2. Rośliny drzewiaste

Jedną z najbardziej rozpowszechnionych roślin drzewiastych na tzw. plantacjach energetycznych, jest wierzba *Salix viminalis* L. Rodzaj *Salix* obejmuje dwupienne drzewa, krzewy i krzewinki, przy czym tylko nieliczne drzewa osiągają znaczne rozmiary. Liczba gatunków wierzb waha się od 300 do 500. Są to rośliny okrytozalążkowe, filogenetycznie uważane za stare, sięgające w swoim rodowodzie górnej kredy. W trzeciorzędzie gatunek ten był już dość liczny i występował także w Polsce. Dzisiejsze wierzyby w większości zasiedlają tereny wilgotne i okresowo zalewane, pomimo to wykształcają głęboki i rozgałęziony system korzeniowy, z którego może wyrastać wiele pni. Drzewa te nie wykształcają krótkopędów, a ich długopędy są cienkie i elastyczne.

Uprawy wierzyby *salix viminalis* mogą być prowadzone w wielu różnych celach. Do najważniejszych z nich można zaliczyć:

- produkcja drewna dla celów gospodarczych i energetycznych,
- ochrona brzegów różnych zbiorników wodnych, potoków i rzek przed falą powodziową, opóźnianie jej spływu,
- ochrona upraw przed wiatrami oraz gleb przed erozją,

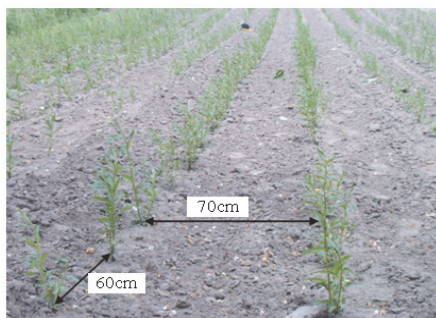
- regulacja stosunków wodnych terenów podmokłych i bagiennych,
- materiał na faszynę do utrwalania brzegów zbiorników wodnych, rzek jak również do stabilizacji podłoża pod drogi,
- oczyszczalnie ścieków komunalnych stosując tzw. oczyszczalnie korzeniowe.

Proces zakładania i prowadzenia plantacji wierzby może być korzystny ekonomicznie, ale tylko wtedy, gdy zostanie poprzedzony odpowiednim rozeznaniem. W ostatnich latach pojawiło się szereg ogólnych informacji nt. zakładania upraw wierzby. Proponowano ich zakładanie, zapewniając jednocześnie, że uprawa ta jest możliwa prawie na wszystkich glebach (bez szczególnych wymagań), a technologia uprawy i zbioru jest bardzo prosta. Brak szczegółowych informacji nt. uprawy, zbioru oraz możliwości magazynowania i dystrybucji spowodował upadek wielu przedsięwzięć.

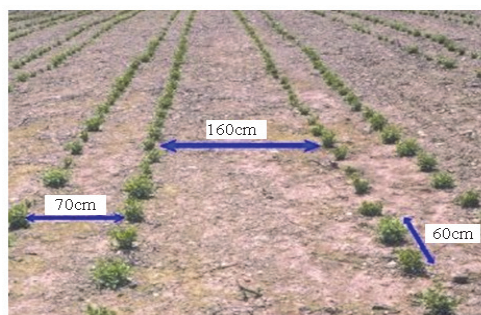
Większość wierzb doskonale rozmnaża się wegetatywnie. Wsadzane są bezlistne odcinki pędów zwane zrzesami, które z wyjątkową łatwością tworzą zawiązki korzeni. W kulturach wodnych, w odpowiedniej temperaturze, dochodzi do wytworzenia przez zrzesy dużej liczby korzeni. Obecnie w wyniku braku normalizacji materiału sadzeniowego wierzby energetycznej wykorzystuje się normę dotyczącą sadzonek wikliny BN-81/9123-02 (Dubas, 2003; Frączek i Mudryk, 2005). Materiał na sadzonki powinien być pozyskany z mateczników sprawdzonych pod względem czystości gatunkowej i odmianowej (z plantacji pozyskiwane są one w odpowiednich terminach). Uprawy plantacji wierzby najczęściej prowadzone są w systemie rzędownym, gdzie ich rozstawy zależą od stosowanej technologii uprawy oraz zbioru. W sytuacji, gdy powierzchnia plantacji jest stosunkowo niewielka producenci najczęściej decydują się na technologie w mniejszym stopniu zmechanizowane, co pozwala zwiększyć obsadę roślin. Obsada ta wynosi około 28 tys.·ha⁻¹ roślin, natomiast ich rozmieszczenie przedstawia rysunek 5.2.1a.

W sytuacji, gdy zabiegi pielęgnacyjne na plantacji będą zmechanizowane, oraz gdy proces zbioru oparty będzie o zbiór maszynowy, obsada powinna wynosić około 20 tys.·ha⁻¹, przy rozstawie roślin jak na rysunku 5.2.1b, zapewniając odpowiednie ścieżki technologiczne.

a)



b)



Rysunek 5.2.1 Widok plantacji wierzby w pierwszym roku uprawy, a – plantacja z obsadą 28 tys.·ha⁻¹, b – plantacja z obsadą 20 tys.·ha⁻¹

Najbardziej przydatnymi gruntami do uprawy wierzby są gleby III, IV i V klasy bonitacyjnej. Warunkiem powodzenia uprawy jest dostateczna ilość opadów. Dotyczy to w szczególności nowo zakładanych plantacji. Niedostateczna ilość opadów w okresie maj – czerwiec może powodować wypadanie nasadzeń, ze względu na niedostateczny rozwój systemu korzeniowego młodych roślin.

Bardzo ważnym czynnikiem dla prawidłowego wzrostu i rozwoju wierzby jest również kwasowość gleby. Wymagania nawozowe wierzby w pierwszym roku wegetacji nie są wysokie i kształtują się w zależności od stosowanej odmiany (Kopp i in., 2001; Dubas, 2005):

- azot (N) od 20 do 30 kg·ha⁻¹,
- fosfor (P) od 10 do 20 kg·ha⁻¹,
- potas (K) od 20 do 40 kg·ha⁻¹.

Technologia produkcji biomasy z wierzby energetycznej najczęściej opiera się o zbiór pędów w rotacji trzyletniej. Należy jednak pamiętać, że po pierwszym roku po założeniu plantacji należy zbierać jednoroczne pędy w celu zwiększenia rozkrzewienia. Pędy w trzecim roku wegetacji (od cięcia) osiągają wysokość dochodzącą niekiedy do 7 m.

Po zakończeniu wegetacji, można przystąpić do wycinania pędów. Okres zbioru wierzby przypada na okres od połowy listopada do końca marca (Szczukowski i in. 2002).

Prowadzone dotychczas doświadczenia wykazały, iż wielkość plonu po trzech latach na stanowiskach odpowiednio dobranych zawiera się w przedziale 55-70 t·ha⁻¹ (Szczukowski i in., 2002; Rosenquist i Dawson, 2005; Mudryk, 2007). W tabeli 5.2.1 przedstawione zostały właściwości trzyletnich pędów wierzby wiciowej zebrane z plantacji 6 letniej (Mudryk, 2007).

Tabela 5.2.1. Wybrane właściwości wierzby

Parametr	średnia	max./min.	odch. stand.
Liczba pędów w karpie (szt.)	9,9	28,0 / 2,0	4,6
Wysokość pędów (m)	4,40	6,55 / 1,85	0,74
Średnica przy podstawie (mm)	27	41 / 15	6,4
Plon (t·ha ⁻¹)	72 *	—	—
	36 **		

* plon świeżej masy po 3 latach,

** plon suchej masy po 3 latach

Źródło: Mudryk, 2007

Drugim gatunkiem rośliny drzewiastej, często wykorzystywanej w uprawach energetycznych, są topole *Populus* L. Wraz z wierzbami należą do rodziny wierzbowatych (*Salicaceae* Lindl.). Niezależnie od gatunku topole odznaczają się bardzo podobnymi wymaganiami siedliskowymi. Ich naturalnym siedliskiem są głównie doliny rzek, potoków czy jezior, gdzie znajdują się odpowiednie warunki związane w szczególności z wilgotnością.

Instytut Badawczy Leśnictwa wskazuje, iż do uprawy plantacyjnej najlepsze efekty pozwala uzyskać uprawa kultywarów topoli ‘Androscoggin’, ‘Fritzi Pauley’, i ‘Hybrida 275’ z sekcji *Tacamahaca* (Zajączkowski, 2003). Prowadzone wieloletnie badania polowe wykazały, iż największą produktywnością w cyklach 5-letnich, wykazały się mieszańce

P. x euramericana (Dode) Gunier ‘Dorskamp’, *P. x interamericana* Van Broekhuizen ‘Barn’ i ‘Beaupré’ wyselekcjonowane w Belgii i Holandii. Odmiany te uprawiane w odpowiednich warunkach siedliskowych są w stanie wyprodukować średnio powyżej 8 t s.m.·ha⁻¹·rok⁻¹ (Zajączkowski, 2006). W ostatnich latach znaczenia nabierają odmiany wyselekcjonowane we Włoszech, w szczególności *P. x generosa* x *P. nigra* (Fara i in., 2009). Odmiana ta jest powszechnie oferowana przez podmioty zajmujące się sprzedażą roślin i zakładaniem plantacji energetycznych.

Plantacje topól powinny być lokalizowane na terenach, gdzie poziom przepływowych wód gruntowych nie jest wyższy niż 70 cm, a w przypadku braku wody gruntowej w zasięgu korzeni w okresie wegetacji, opady roczne wynoszą co najmniej 550 mm. Pod plantacje należy przeznaczać grunty powyżej IVb klasy bonitacji rolniczej. Powinny to być gleby biologicznie czynne, o dobrej przepuszczalności wodnej, przewiewne, zasobne w tlen i podstawowe pierwiastki (NPKCa), odczyn powinien się wahać od 6.0 do 7.5 pH, a dla topól balsamicznych od 5.5 do 6.5 pH.

Materiałem sadzeniowym, podobnie jak w przypadku wierzby wiciowej, są zrzesy o długości ok. 20-25 cm, pochodzące z jednorocznych, zdrowych pędów jednolitych pod względem odmianowym. Coraz powszechniejsza jest metoda produkcji materiału sadzeniowego metodą mikrorozmnażania (wegetatywnego mnożenia *in vitro*). Zaletą tego sposobu jest możliwość uzyskania w krótkim czasie dużej liczby osobników o tym samym wyselekcjonowanym genotypie (Szczygiel, 2006). Przed wysadzeniem sadzonki powinno się umieścić na 24 h w wodzie celem pobudzenia procesów wzrostowych. Sadzenie przeprowadza się w okresie jesiennym lub (zalecane) wczesną wiosną. Sadzenie prowadzone jest ręcznie lub mechanicznie z zastosowaniem specjalnych sadzarek (rys. 5.2.2), których wydajność może sięgać nawet do 1 ha·h⁻¹.



Źródło: www.agropartner.pl

Rysunek 5.2.2. Sadzarka zrzesów topoli SPAPPERI TP

Plon biomasy jaki można uzyskać z upraw szacuje się na 15-21 t s.m. $\cdot$ ha $^{-1}$ ·rok $^{-1}$ (Ceulemans i Deraedt, 1999) przy obsadzie 10000 szt·ha $^{-1}$. W Ameryce Północnej nawadniane i nawożone plantacje topól osiągnęły produkcję 20 t s.m. $\cdot$ ha $^{-1}$ ·rok $^{-1}$ w cyklu czterodo siedmioletnim, a we Francji ok. 30 t s.m. $\cdot$ ha $^{-1}$ ·rok $^{-1}$ w intensywnym cyklu dwuletnim (Karačić i in., 2003).

5.3. Rośliny jednoroczne - trawy i byliny

Rośliną o stosunkowo dobrze opisanych wymaganiach siedliskowych oraz zaleceniach agrotechnicznych jest ślazowiec pensylwański *Sida hermaphrodita* Rusby. Ślazowiec jest byliną, odrastającą corocznie, zwiększającą liczbę łodyg w zwartej kępie od jednej w pierwszym roku (rys. 5.3.1). Należy do rodziny ślazowatych, która obejmuje kilkaset gatunków roślin. Pochodzi z Ameryki Północnej gdzie występuje w środowisku naturalnym kilku stanów m. in. Wirginia i Pensylwania. Inne gatunki z tego rodzaju spotykane są na obszarach Afryki, Australii i Wyspach Zielonego Przylądka. W Polsce pojawił się w latach 50. ale dopiero w ostatnich latach propagowana jest uprawa ślazowca jako rośliny energetycznej (Majtkowski, 2007). Gatunek *Sida hermaphrodita* jest rośliną wieloletnią, polikarpiczną, o corocznie zamierających pędach. W czasie 50 dni od wschodów pojedyncza roślina osiąga wysokość 11-18 cm, a u podstawy łodygi widać formujące się pączki. Pod koniec okresu wegetacyjnego ślazowiec wzrasta na 40-70 cm wysokości. W następnych latach łodygi osiągają średnicę od 5 do 30 mm.

a)



b)



Źródło: a – fot. Wróbel M., b – www.biomax.com.pl

Rysunek 5.3.1. Ślazowiec pensylwański, a – plantacja doświadczalna – pędy w okresie czerwca, b – plantacja obszarowa – pędy w okresie maja

Ślazowiec pensylwański nie ma specjalnych wymagań glebowych. Rośnie na wszystkich rodzajach gleb, nawet na piaszczystych V klasy bonitacyjnej, pod warunkiem, że są dobrze uwilgotnione. Uprawiając ślazowiec na cele energetyczne, czy dla pozyskania nasion, należy pamiętać, że użytkowanie plantacji będzie trwać nie 3-4 lata (użytkowanie paszowe), ale 15-20 lat (Borkowska i Styk, 2006).

Przygotowanie pola pod założenie plantacji ślazuwyma wymaga starannego odchwaszczenia oraz wykonania analiz chemicznych gleby w celu ustalenia właściwych potrzeb wapnowania oraz nawożenia fosforem i potasem. Na polach zaniedbanych (zaperzone i zarośnięte chwastami wieloletnimi) konieczne jest zastosowanie nieselektywnych herbicydów (zawierających glifosat).

Siew jest jedną z najważniejszych czynności w agrotechnice ślazuwyma. Musi on zapewnić określone zagęszczenie roślin na jednostce powierzchni, odpowiednie ich rozmieszczenie i możliwie jak najbardziej wyrównaną głębokość przykrycia nasion. Przedstawione wymagania spełnia siew maszynowy, który równocześnie zmniejsza pracochłonność uprawy. Wysiewając ślazuwicz przy pomocy siewnika zbożowego należy wcześniej wymieszać nasiona z materiałem balastowym (trociny, drobne nasiona pozbawione zdolności kiełkowania, kasza manna lub inny podobny materiał) w celu równomiernego wysiewu tych drobnych nasion. Stosując siewnik ogrodniczy nie musimy mieszać nasion z balastem (Kościk i in., 2003).

Nawożenie ślazuwyma uzależnione jest od kierunku użytkowania plantacji, typu gleby, uwilgotnienia, czynników meteorologicznych itp. W roku zakładania plantacji z reguły nie stosuje się nawożenia mineralnego. W kolejnych latach należy stosować nawozy wczesną wiosną i wymieszać je z glebą. Wyższe dawki nawozów azotowych należy podzielić na dwie części, pierwszą zastosować wraz z nawozami fosforowo-potasowymi, zaś drugą przed zwarciem rzędów.

Pielęgnowanie i ochrona plantacji ślazuwyma koncentruje się głównie na walce z chwastami. Bardzo istotne jest tu właściwe odchwaszczenie gleby przed siewem lub sadzeniem roślin, kiedy możliwe jest zastosowanie herbicydów. Po wschodach roślin ochrona ogranicza się do zabiegów mechanicznych.

Przeprowadzone badania (Borkowska i Styk, 1997), wykazały, że ślazuwicz nie jest porażany przez choroby, które mogłyby zagrozić plantacji.

Biomasa ślazuwyma charakteryzuje się właściwościami, które powodują, iż jest on bardzo dobrym surowcem do produkcji brykietów i peletów (tab. 5.3.1.). Podczas procesów zagęszczania, rozdrobniona rębarką, a następnie zmielona młynem biomasa bardzo dobrze się prasuje dając w efekcie końcowym trwały produkt. Ze względu na te właściwości ślazuwicz może pełnić rolę lepiszcza dodawanego do biomasy o gorszych właściwościach np.: biomasy miskanta.

Tabela 5.3.1. Plony oraz zawartość suchej masy w łodygach ślazuwyma pensylwańskiego w zależności od rodzaju podłoża i sposobu rozmnażania

Rodzaj podłoża	Rozmnażanie	
	generatywne	wegetatywne
	Plon suchej masy ($t \cdot ha^{-1}$)	
Gleba mineralna	15,6-16,0	13,8-17,8
Osad ściekowy	9,3-9,6	11,0-11,3
	Zawartość suchej masy (%)	
Gleba mineralna (zbiór jesienią)	45,0-66,3	45,0-72,4
Osad ściekowy (zbiór zimą)	70,0-77,1	63,4-76,6

Źródło: Kościk i in., 2003

Kolejną rośliną, która posiada istotny potencjał w uprawach energetycznych jest miskant olbrzymi *Miscanthus × giganteus* Greef et Deu. Miskant to okazała, wieloletnia trawa kępowa z rodziny wiechlinowatych pochodząca pierwotnie z krajów Azji Południowo-Wschodniej (rys. 5.3.2.). W środowisku naturalnym występuje na obszarze Japonii, Chin oraz Korei. W Europie uprawiana jest od ok. 50 lat jako roślina ozdobna. Dopiero w 1982 r. w Moser k. Magdeburga została po raz pierwszy w Europie założona plantacja miskanta na cele energetyczne. Miskant olbrzymi jest naturalnym mieszańcem, powstałym ze skrzyżowania miskanta chińskiego (*Miscanthus sinensis* Anders.) z miskantem cukrowym (*Miscanthus sacchariflorus* Maxim.). Roślina o cyklu fotosyntetycznym C4 lepiej wykorzystująca światło w procesie fotosyntezy niż rośliny cyklu C3 (Majtkowska i Majtkowski, 2005).



Rysunek 5.3.2. Miskant olbrzymi na poletku doświadczalnym

Trawa ta nie ma dużych wymagań co do jakości gleby, na której jest uprawiana – mogą to być gleby nawet V klasy, a także nieużytki. Średnia roczna ilość opadów niezbędna do prawidłowego jej wzrostu i rozwoju wynosi 600 mm, a średnia roczna temperatura ok. 8°C. Wadą miskanta jest słaba odporność na mrozy, szczególnie w pierwszym roku uprawy (Grzybek, 2009).

W warunkach Polski miskant nie wytwarza dojrzałych nasion, co uniemożliwia jego generatywne rozmnażanie. Materiał nasadzeniowy uzyskuje się przez produkcję sadzonek

kłaczowych pozyskiwanych z plantacji matecznych (rys. 5.3.3.). Plantację mateczną stanowi najczęściej trzyletnia plantacja miskanta. Sadzonki można pozyskiwać przed lub po wschodach roślin. Wsadzanie można przeprowadzić mechanicznie za pomocą sadzarki ogrodniczej lub ręcznie w odstępach 1 x 1 m. Gęściejsze sadzenie nie jest korzystne ze względu na znaczną wysokość roślin i tworzenie dużej masy nadziemnej (Gradziuk i in., 2003).



Źródło: a – www.cedrus.org.pl, b – Miskantolbrzymi.net-sadzenie

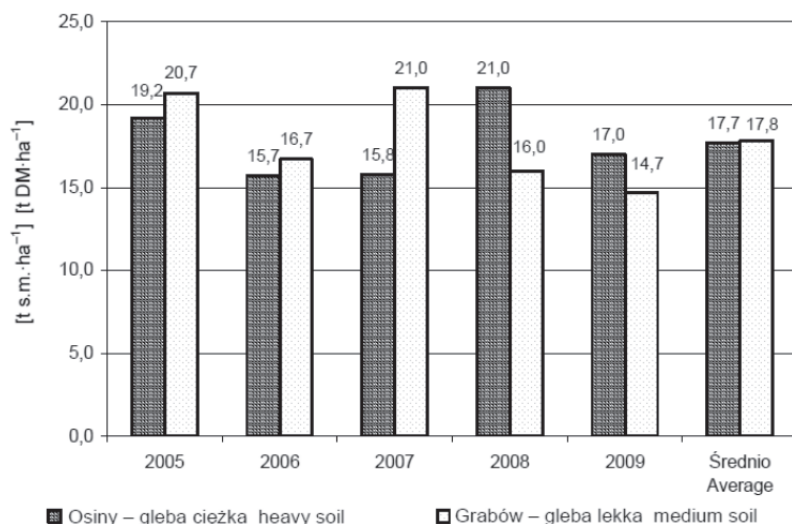
Rysunek 5.33. Zakładanie plantacji, a – sadzonki miskanta olbrzymiego przygotowane do wysadzenia, b – mechaniczne sadzenie

Miskant nie wymaga wysokiego poziomu nawożenia mineralnego, mimo iż wytwarza znaczny plon biomasy. Jako roślina o cyklu fotosyntetycznym C_4 ma większe możliwości przyrostu biomasy i lepiej wykorzystuje światło w procesie fotosyntezy niż rośliny w cyklu C_3 . Dawki nawozów mineralnych dla miskanta olbrzymiego wahają się w granicach: 60-90 kg N·ha⁻¹, 30-40 kg P₂O₅·ha⁻¹, oraz 120-150 kg K₂O·ha⁻¹. Nawozy należy wysiać wiosną po obесchnięciu pola i można je wymieszać z glebą narzędziem stosowanym do odchwaszczania międzyrzędzi. Z plonem miskanta wywozi się z pola małe ilości składników nawozowych, gdyż w czasie zasychania pędów roślina przemieszcza je do karp korzeniowych, a część powraca do gleby z opadającymi liśćmi.

Pielęgnacja plantacji w roku założenia polega głównie na ograniczeniu zachwaszczenia. Niezależnie od sposobu zakładania plantacji, obok mechanicznego zwalczania chwastów w międzyrzędziach, konieczne jest ich ręczne usuwanie z rzędów.

Późną jesienią trzeba zabezpieczyć plantację przed wymarzaniem. Należy wykosić tuż nad powierzchnią gleby odrosty miskanta i pozostawić je na powierzchni pola oraz rozrzuścić cienką warstwę słomy lub liści. W następnych latach wyrównany łan miskanta ogranicza wzrost chwastów. Dotychczas nie stwierdzono na tej roślinie większego nasilenia chorób i szkodników (Faber i in., 2009).

Ze względu na wysoką efektywność wykorzystywania składników pokarmowych mискant odznacza się wysokim potencjałem plonowania na obszarze centralnej i południowej Europy, gdzie przewyższa plonowanie zbóż. Na dobrych glebach, przy sprzyjających warunkach atmosferycznych, można osiągnąć plon biomasy nawet do 40 t·ha⁻¹. Badania prowadzone przez Matykę i Kusia (2011) wykazały, iż plonowanie mискant olbrzymiego w zależności od rodzaju gleby zawiera się w przedziale 15-21 t·s.m.·ha⁻¹ (rys. 5.3.4).



Źródło: Matyka i Kuś, 2011

Rysunek 5.3.4. Plon suchej masy mискanta w zależności od gleby – plon z 2009 r. zebrano wiosną 2010 r.

Zbiór biomasy możliwy jest w okresie od listopada do marca. Jednak ze względu na wilgotność pędów oraz fakt opadania w okresie zimy drobnych liści, zalecane jest prowadzenie zbioru w okresie wczesnej wiosny. Należy mieć jednak na uwadze, iż obfite opady śniegu mogą spowodować wyłeganie roślin na plantacji (rys. 5.3.5a). Ze względu na długi okres użytkowania plantacji (15-20 lat), jak i wysokie plonowanie jest bardzo cenny jako alternatywne źródło energii (Gradziuk i in., 2003).

Kolejną rośliną zaliczaną do gatunków energetycznych jest mискant cukrowy *Miscanthus sacchariflorus* Maxim. Roślina osiągająca wysokość 1-4 m o sztywnych, wypielionych rdzeniem źdźbłach i rozbudowanym, sięgającym do 2,5 m w głąb ziemi systemie korzeniowym, który umożliwia mискantowi cukrowemu skuteczne pobieranie z gleby składników pokarmowych i wody, a duża zawartość ligniny i celulozy chroni go przed uszkodzeniami mechanicznymi (Kościk i in., 2003). Morfologia rośliny bardzo podobna do mискanta olbrzymiego z tą różnicą, że liście i źdźbła stosunkowo mniejsze, a kępa bardziej zwieszła (rys. 5.3.6).

a)



b)



Źródło: a – fot. Wróbel M., b – www.cedrus.org.pl

Rysunek 5.3,5. Plantacje miskanta, a – po wczesnozimowych (listopad) opadach śniegu, b – po pierwszym roku uprawy



Rysunek 5.3,6. Plantacja miskanta cukrowego

Zalecana obsada może wynosić od 1 do 4 roślin na 1 m², co odpowiada rozstawie międzyrzędzi i odległości między roślinami 0,5-1 m. Zalecenia nawozowe w przeliczeniu na hektar, dla miskanta cukrowego wynoszą: 60 kg N, 50 kg P₂O₅ oraz 100 kg K₂O (Gradziuk i in., 2003).

Uprawiany przez wiele lat na jednym miejscu nie wymaga większej pielęgnacji. Zbiór i wykorzystanie biomasy podobnie, jak miskanta olbrzymiego. Daje się łatwo rozmnażać

przez podział rozłogów. Lubi gleby lekkie, zasobne w składniki pokarmowe, o umiarkowanej wilgotności, chociaż toleruje także stanowiska suche, pozbawione kompleksu sorpcyjnego. Posiada zdolność do intensywnego pobierania z gleb metali ciężkich, jest także wykorzystywany jako roślina przeciwerozyjna. Najwyższe plony daje przy wysokich temperaturach i dużym nasłonecznieniu, dobrze reaguje też na nawożenie azotem (Kościk i in., 2003). Wielkość plonu na plantacjach po trzecim roku uprawy wynosi około $12,6 \text{ t.s.m.} \cdot \text{ha}^{-1}$ przy zbiorze wiosennym (po opadnięciu liści) (Kowalczyk-Juško, 2010).

Ze względu na większą odporność na niskie temperatury i suszę miskant cukrowy wydaje się być lepiej przystosowany do uprawy w Polsce niż miskant olbrzymi (nie wymaga ściółkowania) (Kościk i in., 2003).

Jedną z bardziej rozpoznawalnych roślin energetycznych jest słonecznik bulwiasty (topinambur) *Helianthus tuberosus* L. Do Polski sprowadzony został w drugiej połowie XIX w., jako roślina uprawna (rys. 5.3.7). Obecnie występuje też w środowisku naturalnym na całym niżu i w niższych położeniach górskich, jako uciekinier z uprawy. Na niektórych stanowiskach jest dość liczny. Według ekologów stanowi zagrożenie dla gatunków rodzimych i należy zaniechać jego uprawy na obszarach chronionych. W środowisku naturalnym występuje na przydrożach, w zaroślach nadrzecznych.



Rysunek 5.3.7. Topinambur – pędy w okresie czerwiec-lipiec

Słonecznik bulwiasty łatwo zaopatruje się w wodę i składniki mineralne dzięki systemowi korzeniowemu, który jest mocny, dość głęboki (wprawdzie główna masa korzenia znajduje się na głębokości do 30 cm, jednak pojedyncze korzenie sięgają 150 cm w głąb

gleby). Z węzłów podziemnej części łodygi oprócz korzeni wyrastają pędy podziemne (rozłogi), zwane stolonami, na końcach których tworzą się bulwy (rys. 5.3.8). Bulwa pod względem anatomicznym stanowi silnie skróconą, zgrubiałą, mięsistą łodygę podziemną, służącą do wegetatywnego rozmnażania, podobnie jak bulwy ziemniaka. Bulwy topinamburu mają wypukłe oczka i są dość liczne – roślina może wytworzyć do 50 bulw.



Rysunek 5.3.8. Bryła korzeniowa topinamburu w okresie wegetacji, a – forma uprawiana, b – forma dziczała

Wymagania topinamburu są niewielkie. Dobrze znosi zmienne warunki klimatyczne i niskie temperatury jednak najkorzystniejsza dla tego gatunku jest pogoda ciepła i wilgotna. W warunkach ciepłego i słonecznego okresu wegetacji zawiązywanie bulw jest intensywne, natomiast chłody powodują obfitsze tworzenie zielonej masy. Topinambur, podobnie jak inne rośliny okopowe, najlepiej udaje się na glebach średnio zwężłych, przewiewnych, o dużej zasobności w składniki pokarmowe i dostatecznej wilgotności. Może być uprawiany na gorszych stanowiskach, mniej przydatnych do uprawy ziemniaka. Na glebach podmokłych i kwaśnych topinambur słabo plonuje (Góral, 1999).

Uprawa roli pod topinambur powinna być głęboka, ponieważ części podziemne silnie się rozrastają. Głębokość uprawy decyduje o dobrym wzroście roślin w pierwszym roku, jak również plonowaniu w latach następnych. Podstawowym zabiegiem jest głęboka orka do 30 cm, a gdy warstwa orna jest płytka – orka z pogłębiaczem. Uprawki wiosenne na polu zaorany jesienią polegają na stosowaniu brony zwykłej lub aktywnej; jeżeli gleba jest zbita, należy zastosować kultywator na głębokość 12-14 cm. Przed sadzeniem bulw należy wyrównać wierzchnią warstwę gleby, co ułatwi sadzenie i korzystnie wpłynie na kiełkowanie (Kościk i in., 2003).

Materiałem rozmnożeniowym topinamburu są bulwy wielkości 3-6 cm. Sadzenie bulw można wykonać jesienią (XI-XII) lub wczesną wiosną (III-IV). Bulwy są odporne na niskie temperatury. Ukorzeniają się i kiełkują już w temperaturze gleby wynoszącej 4-5°C.

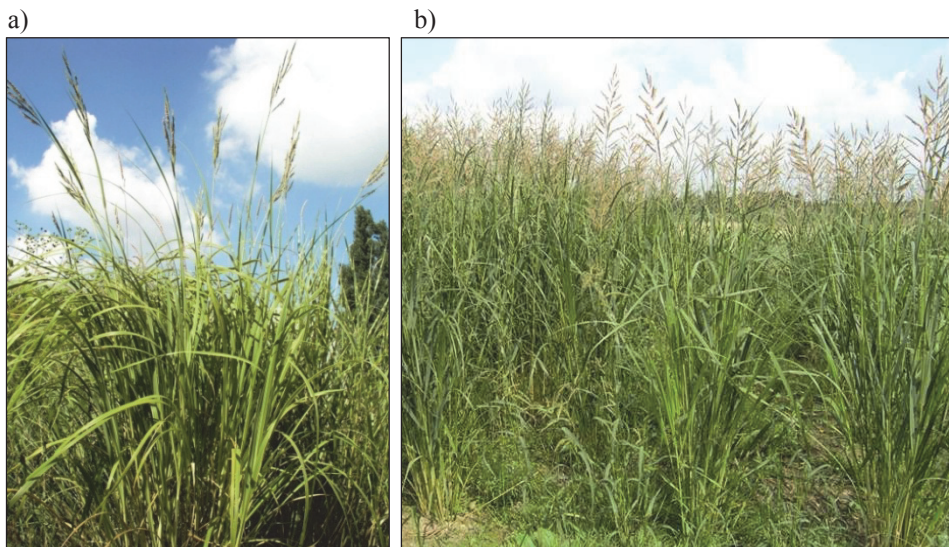
Słonecznik bulwiasty najczęściej uprawia się poza płodozmianem, przez kilka lat na tym samym polu, dlatego konieczne jest tzw. odnawianie plantacji. W tym celu po wykopaniu bulw plantację należy zaorać, następnie wysiać nawozy w zależności od zasobności

gleby (średnio w $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$: 60-80 P_2O_5 i 120-160 K_2O), zabronować i dokładnie zebrać pozostałe bulwy. Z resztek bulw, jakie pozostały w glebie wyrasta zwykle łan roślin o znacznym zagęszczeniu. Aby doprowadzić do właściwej obsady (3-4 rośliny na 1 m^2) należy po wschodach roślin zastosować opielacz międzyrzędowy z nożami bocznymi i przeciąć rzędy o rozstawie nie mniejszej niż 65 cm. Następnie podobny zabieg trzeba przeprowadzić w poprzek rzędów. Rośliny odrastające w międzyrzędziach można wyciąć opielaczem. Pozostałe zabiegi wiosenne przeprowadzać tak, jak w 1 roku: obredlanie, nawożenie azotowe, odchwaszczanie w miarę potrzeb. Zbytne zagęszczenie łanu topinamburu powoduje obniżenie plonu zielonej masy i bulw. Wieloletnia plantacja pozostawiona bez przerzedzania roślin i nawożenia mineralnego staje się nieefektywna (Góral, 1999).

Mniej znaną rośliną wykorzystywaną na plantacjach energetycznych jest *Spartina preriowa* *Spartina pectinata*. Podobnie jak inne gatunki typu C-4, jest okazałą rośliną wyrastającą do wysokości ok. 2 m, tworzącą obszerne, luźne kępy (rys. 5.3.9). Pędy generatywne są puste w środku.

Roślina ta, oprócz energetycznego kierunku wykorzystania, stosowana jest do zabezpieczania brzegów rzek przed erozją. Wykorzystywana jest również do umacniania piaszczystych wałów, grobli i tam. Mocne, ostro zakończone korzenie pozwalają przerastać podłoże niezależnie od jego zwięzłości.

W warunkach Polski spartina wytwarza nasiona, jednak ze względu na szybki spadek zdolności kiełkowania zalecane jest rozmnażanie wegetatywne poprzez podział rozłogów na wiosnę. Trawę tę najczęściej wysadza się w rozstawie rzędów 180-300 cm i 50-75 cm w rzędzie. Plon biomasy po trzecim roku uprawy wynosi średnio $12,5\text{ t}\cdot\text{s.m}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Kowalczyk-Juśko, 2013).



Źródło: a – fot. Wróbel M., b – www.rce.oodr.pl

Rysunek 5.3.9. *Spartina preriowa* *Spartina pectinata*

Obecnie w fazie badań polowych oraz weryfikacji na plantacjach doświadczalnych jest szereg roślin dotychczas wykorzystywanych jako źródło paszy dla zwierząt lub jako rośliny ozdobne. Do grupy tych roślin możemy zaliczyć:

- Proso różgowate *Panicum virgatum*,
- Palczatka Gerarda *Andropogon gerardi*,
- Mozga trzcinowata *Phalaris arundinacea*,
- Słonecznik wierzbolistny *Helianthus salicifolius*,
- Sylfia *Silphium perfoliatum*,
- Szczaw tianszański *Rumex x tianschanicus*.

Plony biomasy przedstawionych roślin są zależne od warunków środowiskowych jednak ich maksymalna wartość nie przekracza $12 \text{ t.s.m.} \cdot \text{ha}^{-1}$. Należy mieć jednak na uwadze, iż większa gama dostępnych roślin umożliwia odpowiednie dobranie gatunku rośliny do uprawy na cele energetyczne uwzględniając wiele czynników między innymi warunki stanowiska, kierunki dalszego przeznaczenia plonu (produkcja paliw płynnych, stałych itp.).

Technologie pozyskania biomasy z terenów rolniczych

Biomasa pozyskiwana z terenów rolniczych (agrobiomasa) wykorzystywana na cele energetyczne, podobnie jak ta stosowana w produkcji zwierzęcej, powinna charakteryzować się odpowiednimi parametrami jakościowymi, w szczególności związanymi z zawartością wody. Wpływa ona bowiem na przebieg procesu magazynowania (intensywność rozwoju procesów biologicznych) oraz na wartość energetyczną materiału. Dlatego też, technologie stosowane w produkcji oraz pozyskaniu agrobiomasy, powinny uwzględniać wysoki stopień mechanizacji poszczególnych etapów. Pozwala to na przeprowadzenie zabiegów w wyznaczonym terminie, wykorzystując często krótkotrwałe, dogodne warunki pogodowe wpływające bezpośrednio na właściwości biomasy.

Agrobiomasa jest możliwa do pozyskania z dwóch kierunków produkcji rolniczej:

- jako pozostałość produkcyjna (słoma zbóż, łuski nasion itp.)
- z produkcji celowej (uprawy energetyczne).

W tabeli 5.3.2 przedstawiono klasyfikację źródeł biomasy zielonej możliwej do pozyskania z terenów rolnych. Największy potencjał biomasy z rolnictwa istnieje przy produkcji ziarna oraz innych nasion (trawy, nasiona roślin oleistych, strączkowych).

Tabela. 5.3.2. Klasyfikacja pochodzenia i źródeł biomasy – fragment dotyczący agrobiomasy z roślin zbieranych w cyklu rocznym – tzw. biomasa zielna

2 Biomasa zielna	2.1 Rośliny zielne rolnicze i ogrodnicze	2.1.1 Zboża	2.1.1.1 Całe rośliny
			2.1.1.2 Słoma
			2.1.1.3 Ziarna lub nasiona
			2.1.1.4 Łuski lub łupiny
			2.1.1.5 Mieszanek i mieszaniny
		2.1.2 Trawy	2.1.2.1 Całe rośliny
			2.1.2.2 Słoma
			2.1.2.3 Nasiona
			2.1.2.4 Łupiny
			2.1.2.5 Mieszanek i mieszaniny
		2.1.3 Rośliny oleiste	2.1.3.1 Całe rośliny
			2.1.3.2 Łodygi i liście
			2.1.3.3 Nasiona
			2.1.3.4 Łuski lub łupiny
			2.1.3.5 Mieszanek i mieszaniny
		2.1.4 Rośliny okopowe	2.1.4.1 Całe rośliny
			2.1.4.2 Łodygi i liście
			2.1.4.3 Korzenie
			2.1.4.4 Mieszanek i mieszaniny
		2.1.5 Rośliny strączkowe	2.1.5.1 Całe rośliny
			2.1.5.2 Łodygi i liście
			2.1.5.3 Owoce
			2.1.5.4 Strąki
			2.1.5.5 Mieszanek i mieszaniny
	2.1.6 Kwiaty	2.1.6.1 Całe rośliny	
		2.1.6.2 Łodygi i liście	
		2.1.6.3 Nasiona	
		2.1.6.4 Mieszanek i mieszaniny	
		2.1.7 Biomasa zielna z konserwacji terenów użyteczności publicznej	
	2.2 Produkty uboczne i pozostałości z przetwórstwa roślin zielnych	2.2.1 pozostałości zielne nie poddane obróbce chemicznej	2.2.1.1 Zboża i trawy
			2.2.1.2 Rośliny oleiste
			2.2.1.3 Rośliny okopowe
			2.2.1.4 Rośliny strączkowe i kwiaty
			2.2.1.5 Mieszanek i mieszaniny
		2.2.2 pozostałości zielne poddane obróbce chemicznej	2.2.2.1 Zboża i trawy
			2.2.2.2 Rośliny oleiste
			2.2.2.3 Rośliny okopowe
			2.2.2.4 Rośliny strączkowe i kwiaty
			2.2.2.5 Mieszanek i mieszaniny
2.3 Mieszanek i mieszaniny			

Źródło: opracowanie własne na podstawie PN-EN 14961-1:2010

5.4. Zbiór biomasy

Stosowane dotychczas technologie produkcji wspomnianych roślin często uwzględniały etap zagospodarowania pozostałości produkcyjnej (np. słomy zbóż lub łądyg traw nasiennych) do dalszego wykorzystania, między innymi jako pasza lub ściółka dla zwierząt. W związku z powyższym, obecnie producenci mają do dyspozycji szereg maszyn pozwalających na wstępne przetworzenie biomasy do formy (bele, kostki, big-bag) umożliwiającej przeprowadzenie etapów logistycznych (załadunek, transport, magazynowanie itp.), a nawet wykorzystać jako paliwo w urządzeniach energetycznych (kotły na słomę w formie kostek, bel).

Do zagęszczania biomasy przeznaczonej na cele energetyczne najczęściej wykorzystywane są prasy kostkujące oraz rolujące. W gospodarstwach niskozmechanizowanych, gdzie część prac związanych z załadunkiem i rozładunkiem dokonywanych jest ręcznie, częściej stosowane są prasy kostkujące pozwalające na uzyskiwanie kostki o masie około 10-15 kg i wymiarach około 40x40x (40-120) cm (rys. 5.4.1a). Gęstość właściwa uzyskiwanych kostek zawiera się w przedziale 110-180 kg·m⁻³. W przypadku gospodarstw wielkoobszarowych częściej wykorzystywane są prasy wielkogabarytowe (rys.5.4.1b), w których geometria uzyskiwanych beli prostopadłościennych wynosi około 85x120x240cm a stopień zagęszczenia 120-180 kg·m⁻³.

a)



b)



Źródło: www.adrianolek.com

Rysunek 5.4.1. Prasy kostkujące, a – małogabarytowe, b – wielkogabarytowe

W przypadku wykorzystywania zebranej biomasy jako paliwa do bezpośredniego spalania w kotłach, ze względu na kształt komór spalania (najczęściej walcowy), stosowane są najczęściej prasy pozwalające na uzyskanie beli cylindrycznych (rys. 5.4.2) o geometrii około $\varnothing 120 \times 120$ cm i podobnej gęstości jak wspomniane wcześniej bele prostopadłościenne.



Źródło: www.claas.dbv.pl

Rysunek 5.4.2. Prasa rolująca

W przypadku biomasy odpadowej o większym stopniu rozdrobnienia (frakcje z czyszczenia nasion, okrywy nasienne itp.) stosowane są rozwiązania wykorzystujące opakowania tzw. big-bag o objętości około 0,8-1,4 m³ (rys. 5.4.3). Ta technologia dedykowana jest w szczególności do biomasy sypkiej o stosunkowo dużej gęstości usypowej (powyżej 100 kg·m⁻³) umożliwiając prowadzenie działań logistycznych oraz handlowych.



Źródło: www.Tapfrance.info

Rysunek 5.4.3. Materiał sypki umieszczony tzw. big-bagach

W przypadku biomasy odpadowej o mniejszej gęstości usypowej – poniżej $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (siecarka, plewy itp.) – coraz częściej wykorzystywane są prasy do materiałów sypkich z możliwością owinięcia uzyskanych bel materiałem (np. folia, flizelina). Urządzenia te dostępne są zarówno w wersjach mobilnych (napęd od ciągnika, własnych silników spalinowych), jak i stacjonarnych (napęd elektryczny, od silników spalinowych) (rys. 5.4.4). Stopień zagęszczenia materiałów jest wprawdzie zależny od właściwości zagęszczanego surowca, jednakże konstrukcja układu zagęszczającego pozwala na uzyskanie podobnego stopnia zagęszczenia co w prasach kostkujących (Nowak, 2010).

a)



b)



Źródło: a – www.orkel.no, b – www.aeroab.com

Rysunek 5.4.4. Widok pras do zagęszczania materiałów rozdrobnionych w formę bel,
a – Orkel 2000 Compactor, b – LT-Master Aero AB

Uzyskane bele o standardowych wymiarach mogą być bez większych problemów podane działaniom logistycznym z wykorzystaniem urządzeń dedykowanych do bel cylindrycznych (np. ze słomy, siana).

Drugim kierunkiem w pozyskaniu agrobiomasy możliwej do wykorzystania na cele energetyczne są celowe uprawy. Plantacje energetyczne najczęściej zlokalizowane są na gruntach wyłączonych z produkcji rolnej (obszary zalewane, zdegradowane przez przemysł itp.) zwiększając tym samym wymagania techniczno-technologiczne stojące przed wykorzystywanymi urządzeniami. Uprawy drzewiastych gatunków roślin szybko rosnących (np. wierzy, topoli) położone są najczęściej na obszarach o wysokim poziomie wód gruntowych, co jest powodem występowania wielu utrudnień w wykorzystywaniu maszyn do zbioru i transportu biomasy. Zbiór biomasy na wspomnianych plantacjach prowadzony jest w okresie jesienno-zimowym (listopad – marzec). Występujące warunki pogodowe (okrywa śnieżna, roztopy itp.) często dodatkowo utrudniają wówczas prowadzone prace. Maszyny w takich warunkach oprócz trudności w przemieszczaniu się, powodują uszkodzenia roślin na plantacji (uszkodzenia systemu korzeniowego itp.) obniżając w kolejnych latach plony biomasy oraz zwiększając ryzyko występowania chorób (rys. 5.4.5).

Zbiór biomasy z celowych plantacji prowadzony jest zarówno w cyklach jednorocznych jak i wieloletnich. Zbiór coroczny realizować można na większości plantacji. Jednak ze względu na zróżnicowane przyrosty biomasy w poszczególnych okresach wegetacji,

zbiór drzew i krzewów powinien być realizowany w cyklach wieloletnich (rotacja od 3 do 5 lat). Do tej grupy możemy zaliczyć między innymi wierzbę wiciową *Salix viminalis* L. (zbiór co dwa, trzy lata), topolę *Populus* L. (zbiór co trzy – pięć lat), robinie akacjową *Robinia pseudoacacia* L. (zbiór co trzy – pięć lat) (Frączek i in., 2009).



Rysunek 5.4.5. Plantacja wierzby w trakcie zbioru przy niedogodnych warunkach pogodowo-glebowych

Zbiór biomasy w cyklach jednorocznych (trawy i byliny)

Zbiór biomasy w cyklach jednorocznych realizowany jest w uprawach roślin jednorocznych (kukurydzy *Zea mays* L., sorga *Sorghum* Moench, konopi siewnych *Cannabis sativa* L. itp.) oraz na wieloletnich plantacjach traw i bylin (miskant olbrzymi *Miscanthus × giganteus* Greek ed Deu., ślázowiec pensylwański *Sida hermaphrodita* Rusby, itp.). Może on być zarówno jedno- jak i wieloetapowy. Wybór techniki oraz technologii zbioru jest uwarunkowany wieloma czynnikami:

- dostępnością maszyn w danym regionie,
- pożądanymi właściwościami uzyskiwanego surowca (np. zawartość wody możliwa jest do obniżenia poprzez zastosowanie procesu sezonowania całych pędów),
- formą zebranej biomasy (bele, sieczka, zrębki – stopień rozdrobnienia).

Zbiór biomasy w technologii jednoetapowej polega na wykonaniu szeregu operacji podczas jednego przejazdu roboczego. W tej technologii możliwe jest pozyskiwanie pędów całych jak i poddanie ich w końcowym etapie rozdrobnieniu.

Zbiór całych pędów można prowadzić wykorzystując tzw. ścinacze zielonek (rys. 5.4.6). Podczas zbioru maszyna jednocześnie realizuje proces ścinania, wstępne rozdrabnianie oraz transport biomasy do skrzyni ładunkowej. Biomasa zebrana tą technologią charakteryzuje się wieloma wadami w aspekcie energetycznego wykorzystania:

- niska gęstość usypowa na poziomie $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ oraz luźna forma masy utrudniają transport na większe odległości,
- długość cząstek biomasy w przedziale 12-30cm wymusza stosowanie dodatkowych maszyn rozdrabniających zarówno przy produkcji paliw kompaktowanych jak i biogazu,
- maksymalna wysokość zbieranych pędów nie powinna przekraczać 250 cm.



Źródło: www.zamet.org.pl

Rysunek 5.4.6. Ścinacz zielonek

Zbiór jednoetapowy biomasy z plantacji jednorocznych realizowany jest najczęściej maszynami (sieczkarnie samojezdne) pozwalającymi zebranie biomasy w formie sieczeni (rys. 5.4.7). Biomasa po zbiorze może stanowić surowiec do produkcji biogazu lub może być przetworzona na paliwa aglomerowane takie jak pelet lub brykiet. Uzyskiwania sieczeni ma bardzo małą gęstość usypową (od 50 do $150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), sprawiając, iż jej transport jest opłacalny jedynie przy niewielkich odległościach.

Stosunkowo duża oferta maszyn tego typu na rynku sprawia, iż możliwy jest zbiór roślin uprawianych zarówno rzędowo (miskant, ślazier) jak i w łanie (topinambur, proso różgowe).

Zbiór wieloetapowy polega na przeprowadzeniu zabiegu przy minimum dwóch przejazdach technologicznych. Technologia ta umożliwia uzyskanie materiału w różnych formach (sieczeńka, kostki itp.) oraz pozwala na zastosowanie naturalnego dosuszania materiału. Można w niej wyszczególnić trzy zasadnicze etapy. Pierwszy, związany jest ze ścięciem roślin i pozostawieniu ich na podłożu. Przy sprzyjających warunkach pogodowych ścięty materiał można dosuszyć, obniżając tym samym koszty w kolejnych etapach przetwarzania. Drugi etap obejmuje najczęściej procesy formowania w wiązki, kostki lub bele. Możliwe jest również zastosowanie sieczkarni w celu uzyskania materiału rozdrobnionego. Ostatni, trzeci etap, dotyczy transportu zebranej biomasy w miejsce magazynowania lub bezpośrednio do jednostek przetwarzających.



Źródło: a – www.RPT.pl, b – www.miskantolbrzymi.net-zbiór

Rysunek 5.4.7. Maszyny do zbioru jednoetapowego; a – sieczkarnia zawieszana na ciągniku, b – sieczkarnia samojezdna

Procesy ścinania można realizować większością kosiarek do zielonek dostępnych na rynku (listwowe, dyskowe itp.) (rys. 5.4.8). Wydajność tego procesu wynosi do $4 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ i uzależniona jest od wielu czynników, między innymi od:

- gatunku zbieranej rośliny,
- wielkości plonu,
- wilgotności materiału,
- szerokości roboczej maszyny oraz prędkości pracy.



Źródło: a – www.adlib.eversite.co.uk, b – Göecke

Rysunek 5.4.8. Koszenie pędów miskanta: a) kosiarka dyskową, b) miskanta sieczkarnią samojezdną

Kolejnym etapem jest zbiór skoszonej biomasy. W przypadku gdy biomasa poddana była naturalnemu podsuszaniu możliwe jest zastosowanie maszyn zaczepianych lub samojezdných umożliwiających podbieranie pokosów celem ich rozdrobnienia (rys. 5.4.9). Maszyny te umożliwiają uzyskanie siewki podobnych właściwościach jak przy zbiorze jednoetapowym.

a)



b)



Źródło: a – www.piomaragrotech.pl, b – www.agrom.pl

Rysunek 5.4.9. Sieczkarnie z podbieraczem pokosów, a – doczepiana, b – samojezdna

Jednak ze względu na niską gęstość usypową biomasy uzyskiwanej podczas zbioru wieloetapowego, najczęściej wykorzystywane są prasy wysokiego zgniotu, zarówno kostkujące (rys.5.4.10), jak i rolujące zbieraną masę. Wydajność tych maszyn sięga nawet do $5 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ i jest zależna od gatunku rośliny energetycznej, topografii terenu i warunków pogodowych.

Biomasa zebrana w formie beli lub kostek cechuje się stosunkowo powtarzalnymi właściwościami fizycznymi – podnosi to jej jakość.



Źródło: www.claas.dbv.pl

Rysunek 5.4.10. Prasa kostkująca wielkogabarytowa

Ostatnim elementem w technologii zbioru z plantacji energetycznych jest transport, który odbywa się najczęściej przy wykorzystaniu klasycznych środków transportowych stosowanych dla materiałów objętościowych oraz sprasowanych w formę kostek lub beli.

Zbiór biomasy z plantacji roślin drzewiastych

Zbiór biomasy z plantacji drzew szybkorosnących prowadzony jest podobnie jak w przypadku roślin jednorocznych najczęściej dwoma technologiami. Pierwsza – jednoetapowa – pozwala na zebranie biomasy drzewnej najczęściej w formie zrębków; druga – wieloetapowa – umożliwia uzyskać zrębki, bele, wiązki jak również całe pędy. Zastosowanie poszczególnych technologii jest w największym stopniu uzależnione od dostępności maszyn oraz od pożądanych właściwości zbieranej biomasy.

Pozyskiwana biomasa charakteryzuje się niekorzystnymi właściwościami fizycznymi, istotnymi w dalszych procesach. Do najbardziej istotnych należy zaliczyć zawartość wody, która jest zbliżona do 60%.

Prowadzone badania związane z magazynowaniem zrębków w formie pryzmy, o kącie bocznym około 40° i wysokości w przedziale 1,5 do 6 m wykazały, iż zawartość wody powyżej 45% powodowała wzrost temperatury, tym samym podnosił się poziom aktywności biologicznej. Wewnątrz pryzmy temperatura wzrastała nawet do 60°C (Christine i in., 2004; Jirjis, 2005). W przypadku, gdy okres magazynowania sięgał kilku miesięcy (najczęściej powyżej 6 miesięcy) zaobserwowano spadki ilości suchej masy nawet o 10%. Biorąc pod uwagę powyższe informacje, zrębki o wilgotności powyżej 50% przed procesem sezonowania czy też magazynowania, należy podsuszyć do wilgotności optymalnej dla przewidywanego czasu magazynowania lub dalszych etapów technologii.

W przypadku jednoetapowego zbioru najczęściej wykorzystuje się kombajny do zielonek wyposażone w specjalną przystawkę pozwalającą na ścinanie pędów o średnicy sięgającej 8 cm (rys. 5.4.11b). Przeprowadzone doświadczenia (Volk i in., 2008) wykazały, iż przy zbiorze trzyletnich pędów wierzb kombajnem firmy Newholland serii FR z zastosowaną przystawką można osiągnąć wydajność na poziomie 1,4 ha·h⁻¹.

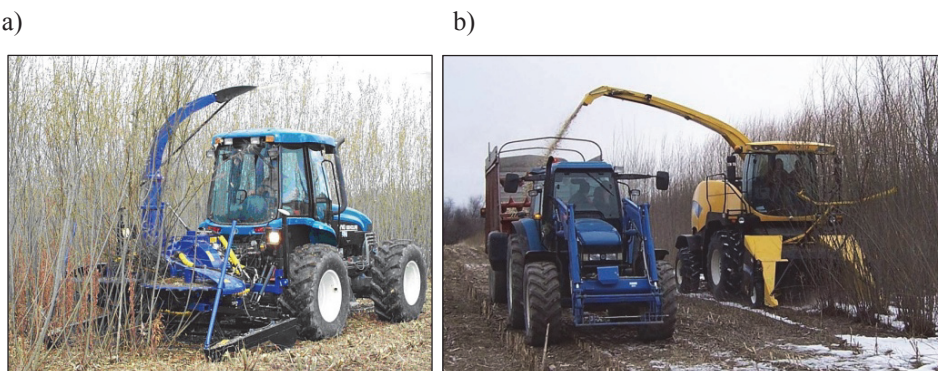
Maszyny wykorzystywane do zbioru pędów zdrewniałych występują zarówno jako samojezdne, jak i w formie zaczepianej oraz zawieszanej na ciągniku rolniczym. Są najczęściej przystosowane są do zbioru roślin uprawianych rzędowo (rys. 5.4.12).

Istnieje również możliwość zastosowania urządzeń pozwalających na zbiór pędów uprawianych w tzw. łanie (rys. 5.4.12a). Maszyny te dostępne są jako samojezdne lub zawieszane na typowych ciągnikach rolniczych. Najczęściej zastosowany jest w nich łańcuch roboczy (podobny jak w pilarcze), co umożliwia prowadzenie zbioru zarówno na plantacjach rzędowych, jak i prowadzonych w łanie. Maszyny tego typu można wykorzystać również do zbioru samosiejek na terenach ugorowanych.



Źródło: fot. Kwaśniewski i Mudryk, 2010

Rysunek 5.4.11. Maszyna zawieszana do zbioru jednoetapowego drzew szybkorosnących: a – urządzenie opracowane w ATB Poczdam, b – elementy robocze, c – zrębki uzyskane z topoli, d – prototyp maszyny opracowany na SGGW, e – elementy robocze – ścinające rośliny



Źródło: a – www.salix.se 1, b – www.Sroc.cfans.umn.edu

Rysunek 5.4.12. Maszyny do zbioru jednoetapowego a – Bender firmy AB Maskiner Salix z łańcuchowym systemem tnącym, b – sieczkarnia firmy New Holland z tarczowym systemem tnącym

Badania prowadzone przez Technical Development Branch (Forest Research, 1998) wykazały, iż maszyny typu Bender firmy Maskiner Salix można zastosować do zbioru zarówno wierzby jak i topoli (3-4 letniej) przy wydajności około 0,16-0,22 ha·h⁻¹.

Stosowanie technologii zbioru wieloetapowego roślin drzewiastych z plantacji wieloletnich umożliwia uzyskanie zebranej masy w formie całych pędów oraz w formie wstępnie rozdrobnionej sformowanej w bele. Zastosowanie takich technologii pozwala na prowadzenie sezonowania całych pędów ułożonych luzem lub w formie wiązek celem obniżenia zawartości wody (rys. 5.4.13). Zabezpiecza to biomasę przed rozwoju grzybów i bakterii, a spadek wilgotności w okresie wiosennym z poziomu 50% do 25% jest możliwy już po 4 miesiącach (Frączek , Mudryk 2009).



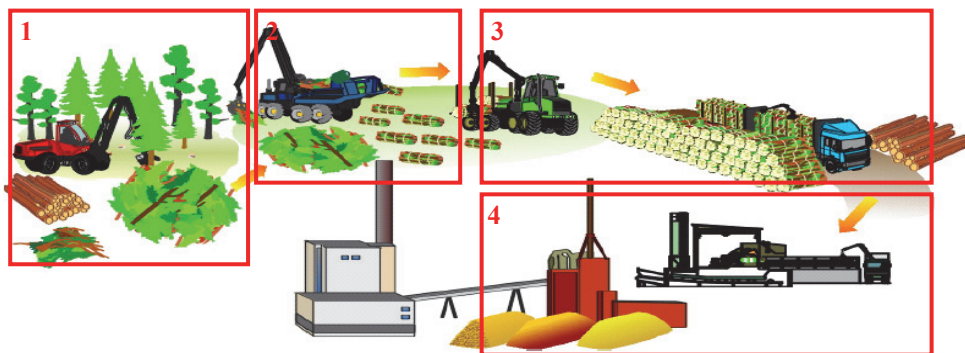
Źródło: a – fot. Wróbel M., b – NORDIC BIOMASS-sezonowanie

Rysunek 5.4.13. Sezonowane pędy wierzby

Analizując technologie zbioru wieloetapowego roślin drzewiastych można wyszczególnić następujące rodzaje:

- a) zbiór trzyetapowy
 - ścinanie ręczne lub mechaniczne,
 - formowanie w wiązki ręcznie lub mechanicznie,
 - transport w miejsce dalszego przetwarzania lub magazynowania,
- b) zbiór dwuetapowy
 - ścinanie roślin z jednoczesnym formowaniem w wiązki lub bele,
 - transport w miejsce dalszego przetwarzania lub magazynowania.

W przypadku upraw wierzby, możliwe jest zastosowanie technologii stosowanych do pozyskania biomasy leśnej. Charakteryzują się one wysokim stopniem zmechanizowania poszczególnych procesów (rys. 5.4.14). Pozostałości leśne ułożone w pryzmach są najczęściej formowane w wiązki, następnie transportowane w miejsce sezonowania. Po tym okresie są rozdrabniane bezpośrednio przy zakładach energetycznych. Ten system umożliwia redukcję kosztów związanych z suszeniem. Biomasa w formie wiązek jest łatwa w przeładunkach i transporcie, a zastosowanie stacjonarnych maszyn do rozdrabniania pozwala na uzyskanie dużej wydajności przy zachowaniu odpowiedniej jakości zrębków.



Źródło: Mudryk, 2007

Rysunek 5.4.14. Schemat technologii pozyskania biomasy leśnej: 1 – pozyskiwanie biomasy i układanie jej w hałdy, 2 – formowanie w wiązki, 3 – transport i sezonowanie, 4 – rozdrabnianie i magazynowanie zrębków

Przedstawiona powyżej technologia pozyskania zrębków zaadaptowana do zbioru wierzby lub innych roślin drzewiastych, umożliwi szybkie zmechanizowanie poszczególnych jej procesów. Modyfikacji ulec powinien jedynie pierwszy etap tj. sposób pozyskania biomasy. Ścinanie pędów wierzby i układanie ich w hałdy na plantacji może być prowadzone ręcznie lub z wykorzystaniem maszyn. Natomiast kolejne etapy przedstawianej technologii mogą być bezpośrednio wdrażane do przetwarzania wierzby. Formowanie ściętych pędów w znormalizowane wiązki (pod względem średnicy i długości) może być prowadzone specjalnymi maszynami (np. FIBERPAC firmy John Deere). Wiązki te łatwo transportować oraz układać w stosy na okres sezonowania. Sam proces formowania może być realizowany w terminie późniejszym (niezależnie od terminu zbioru), co ułatwi organizację pracy.

Zastosowanie tej technologii umożliwia prowadzenie procesu zrębkowania bezpośrednio u odbiorcy. Rozwiązanie to ma szereg zalet, a do najważniejszych można zaliczyć:

- proces zrębkowania wykonywany jest na bieżąco według potrzeb. Zapewnia to uzyskiwanie zrębków najwyższej jakości (nie porażonych grzybami i pleśniami),
- przy stosowaniu maszyn stacjonarnych możliwe jest uzyskanie dużej wydajności,
- kontrola jakości zrębków może być prowadzona na bieżąco, a ich parametry ustalane zgodnie z wymogami danego zakładu.

W sytuacji, gdy plantacja jest niewielka i traktowana jako źródło biomasy dla własnego gospodarstwa, technologia zbioru jest najczęściej oparta o wykorzystanie ręcznych pił lub kos mechanicznych (Dubas i in., 2004). Możliwość wyboru dogodnego terminu (tak aby warunki atmosferyczne były sprzyjające) oraz względnie długi okres możliwego zbioru sprawia, że metoda ta cieszy się dość dużym powodzeniem. Według przeprowadzonych badań (Kwaśniewski i in., 2006; 2008) optymalny skład zespołu prowadzącego zbiór pędów wierzby powinien zawierać jednego pilarza oraz dwóch pomocników (rys. 5.4.15). Pędy są ścinane piłą łańcuchową lub kosą mechaniczną, a następnie formowane w wiązki o masie około 20-30 kg. Wydajność pracy zespołu wynosi około 0,016-0,024 ha·h⁻¹ (ścinać oraz wstępne formowanie w wiązki).

a)



b)



c)



Źródło: Kwaśniewski, 2009

Rysunek 5.4.15. Zbiór wierzby *Salix viminalis* L.; a – widok plantacji przed zbiorem, b – ścinanie z wykorzystaniem piły mechanicznej, c – ścięte i uformowane wiązki pędów przygotowane do transportu

Do ścinania pędów roślin drzewiastych wykorzystywane są coraz częściej amatorsko wykonywane maszyny jednorzędowe zaczepiane do ciągników małej mocy (rys. 5.4.16). Realizują one proces cięcia pozostawiając ścięte rośliny luzem na polu. Ich wydajność wynosi zazwyczaj około $0,25 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$. Czasem z kosiarką agregatowaną jest platforma do odbioru ściętych pędów i formowania w wiązki, które przekazywane są za pomocą wysięgnika na przyczepę transportową. Wydajność przedstawionego rozwiązania nie jest obecnie zdefiniowana, jednakże obciążenie osób obsługujących uległo znacznemu zmniejszeniu.

W krajach skandynawskich, gdzie plantacyjna uprawa drzew szybkorosnących jest bardzo powszechna, dostępne są maszyny do ścinania pędów z załadunkiem na skrzynie oraz z bezpośrednim formowaniem w wiązki. Produkowane są jako zaczepiane do ciągników rolniczych oraz jako samojezdne. Ze względu na trudne warunki polowe występujące podczas zbioru, stosowane są różne warianty systemów jezdnych, począwszy od kołowych (wykorzystujących ogumienie niskociśnieniowe pracujące przykładowo w systemie tandem) kończąc na układach gąsienicowych preferowanych na grunty o małej nośności (rys. 5.4.17a). Wydajność tego typu maszyn w zależności od modelu oraz istniejących warunków polowych wynosi około $0,09\text{-}0,5 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ (Forest Research, 1998).

Koszty usługi ścinania są wysokie i przykładowo koszt zbioru w roku 2010 wierzby lub topoli (3-4 letniej) maszyną Stemster MK III (rys. 29b) firmy Nordic Biomass wynosiły 1375 DKK/h (ok. $855 \text{ zł} \cdot \text{h}^{-1}$) plus koszty transportu maszyny (SRC SERVICES Nordic Biomass).

Załadunek oraz transport zebranej masy w miejsce magazynowania może odbywać się klasycznymi maszynami rolniczymi lub pojazdami samozaładowczymi wyposażonymi w chwytaki hydrauliczne

W ostatnich latach pojawiły się na rynku maszyny do zbioru między innymi wierzby energetycznej pozwalające uzyskać zebrany materiał w formie beli (rys. 5.4.18). Ścięty materiał jest wstępnie rozdrabniany na odcinki 30-50 cm i formowany w bele. Uzyskiwane bele charakteryzują się podobnymi właściwościami fizycznymi jak te uzyskiwane z pras do słomy (średnica i szerokość – 120 cm, masa – 500-600 kg).

a)



b)



c)



Źródło: a,b – www.ze.strefa.pl, c – Sobek M.

Rysunek 5.4.16. Kosiarka do ścinania pędów wierzby; a i b – widok kosiarki,
c – platforma do odbioru ściętych pędów wraz z przyczepą transportową

a)



b)



Źródło: a – Gro, Culshaw 2001; b – www.metaltech.com.pl

Rysunek 5.4.17. Maszyny do zbioru całych pędów roślin drzewiastych uprawianych rzędowo a – kombajn do zbioru drzew uprawianych w szybkiej rotacji opracowany przez NORDIC BIOMASS i Border Biofuels LTd., b – maszyna do zbioru drzew uprawianych w szybkiej rotacji produkowana w Polsce przez firmę Metaltech

Według producenta maszyny BIOBALER (Anderson-Canada) biomasa zwinięta w bele, nawet przy wilgotności przekraczającej 50%, w okresie magazynowania naturalnie obniża zawartość wody bez ryzyka rozwoju grzybów i pleśni. Wydajność procesu zbioru drzew szybkorosnących uprawianych na plantacji wynosi około $20 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ ($40 \text{ beli} \cdot \text{h}^{-1}$).



Rysunek 5.4.18. Maszyna do zbioru roślin drzewiastych w formie beli – BIOBALER

Maszyny te wyposażane są opcjonalnie w dwa systemy tnące. Pierwszy to bęben (mulczy) wyposażony w noże tnące rozmieszczone na obwodzie. System ten jest uniwersalnym rozwiązaniem zarówno do zbioru roślin uprawianych rzędowo jak również w tzw. łanie. Biobaler można również wykorzystywać do zbioru tzw. samosiejek oraz roślin zlokalizowanych wzdłuż cieków wodnych (najczęściej wierzby). Wadą tego systemu jest jakość

cięcia pędów. W sytuacji prowadzenia wieloletnich plantacji energetycznych konieczne jest zebranie biomasy tak, aby nie dochodziło do uszkodzenia karp roślin. Prezentowany system tnący powoduje liczne pęknięcia karp oraz nie utrzymuje stałej wysokości cięcia (rys. 5.4.19).

a)



b)



Rysunek 5.4.19. Maszyna BIOBALER; a – bębnowy system tnący, b – plantacja po zbiorze

Drugim systemem tnącym, który jest stosowany w BIOBALERACH, są tarcze tnące. Ich zastosowanie umożliwia precyzyjne ścięcie roślin na ustalonej wysokości, a karpy pozostają nieuszkodzone. Jest on rzadziej stosowany, ponieważ zawęża możliwości wykorzystania maszyny do zbioru roślin w innych warunkach. Układ bębnowy, w porównaniu z tarczami tnącymi jest bardziej odporny na trudne warunki pracy i jest często wykorzystywany przy zbiorze roślin z terenów odłogowanych (samosiejek), jak również przy pracach komunalnych (koszenie zarośli przydrożnych itp.).

Innym rozwiązaniem zbioru dwuetapowego roślin drzewiastych jest wykorzystanie maszyn do ścinania z jednoczesnym formowaniem w wiązki (rys. 5.4.20). Uzyskany materiał w formie wiązek można poddać sezonowaniu (obniżenie zawartości wody) podobnie jak pędy zebrane luzem. Wiązki roślin charakteryzują się powtarzalnymi właściwościami fizycznymi (geometria, masa itp.) co ułatwia późniejsze procesy transportu oraz magazynowania.



Źródło: www.Salix.se2

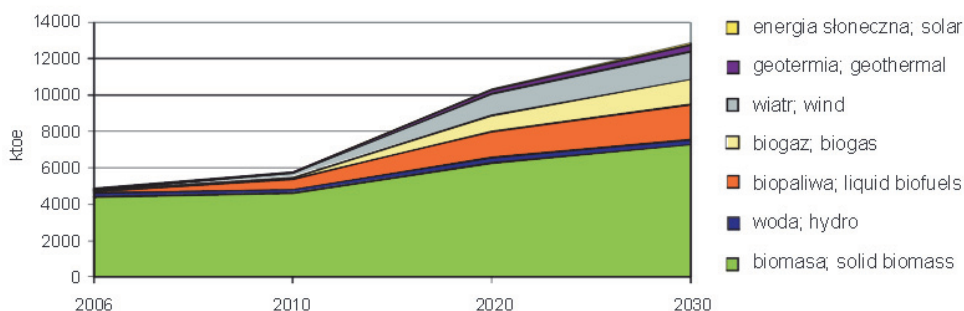
Rysunek 5.4.20. Maszyna Bundler firmy Salixphere do zbioru pędów drzew szybkorosnących w formie wiązek

6. UWARUNKOWANIA TECHNOLOGICZNE I TECHNICZNE DOSTAW BIOMASY

6.1. Rozwój produkcji biomasy

W wielu dokumentach strategicznych wskazuje się na znaczący potencjał biomasy pochodzenia rolniczego, jednak stopień jej wykorzystania jest nadal niewystarczający. Stosunkowo wolny rozwój sektora bioenergii wpłynął na to, że Unia nie znalazła się na planowanej ścieżce rozwoju prowadzącej do podwojenia produkcji energii z OZE (odnawialnych źródeł energii) w roku 2010. Jednym z podstawowych problemów jakie zidentyfikowano, jest stosunkowo mała rzeczywista dostępność zasobów biomasy, która jest spowodowana faktem braku sukcesu w zakresie rozwoju upraw energetycznych w Europie na większą skalę.

W polskich warunkach technologie wykorzystujące biomasę stanowią będą podstawowy kierunek rozwoju odnawialnych źródeł energii do roku 2030 (rys. 6.1.1). Wykorzystanie biomasy pochodzenia rolniczego w znaczącym stopniu może przyczynić się do pobudzenia rozwoju gospodarczego na terenach wiejskich poprzez zróżnicowanie działalności (nowe rynki zbytu surowców rolnych, nowe rodzaje działalności gospodarczej) i stanowić powinno istotny element polityki rolnej.



Źródło: Polityka energetyczna Polski do 2030r.

Rysunek 6.1.1. Zapotrzebowanie na energię finalną do roku 2030 – struktura produkcji z OZE

Zakłada się, że pozyskiwana na ten cel biomasa w znacznym stopniu pochodzić będzie z upraw energetycznych. Poza biomasą pochodzenia rolniczego, nadal duże znaczenie będzie miało wykorzystanie biomasy leśnej oraz użyteczne wykorzystanie biomasy zawartej w różnego rodzaju odpadach przemysłowych i komunalnych, tworząc nowe możliwości dla dynamicznego rozwoju lokalnej przedsiębiorczości (Rogulska i in., 2011).

Biomasa, w zależności od sposobu przetworzenia, może być wykorzystywana do produkcji ciepła, energii elektrycznej i paliw transportowych. Podstawowym paliwem stałym z biomasy jest biomasa leśna występująca w postaci polan, zrębków, wiór, trocin. Odrębną grupę stanowią paliwa z biomasy rolniczej pochodzące z plantacji przeznaczonych na cele energetyczne (wierzba, miskant, malwa, topola i in.) oraz pozostałości organiczne z rolnictwa, produkcji zwierzęcej i przetwórstwa rolno-spożywczego (Frączek i in., 2012). W tej grupie ogromne rezerwy tkwią w energetycznym wykorzystaniu słomy.

Biomasa jako surowiec energetyczny jest silnie zróżnicowana pod względem stanu skupienia, ciężaru właściwego, wilgotności, zwartości, wartości opałowej. W większości jest to surowiec o dużej objętości i zawartości wody, wytwarzany na rozproszonych przestrzennie polach i lasach. Z tych względów wymaga dużych nakładów na zbiór, transport, magazynowanie i dosuszenie. Wymaga zatem sprawnego systemu organizacyjnego i logistycznego, celem maksymalnego ograniczenia kosztów transportu i dalszego przetworzenia (Gostomczyk, 2012).

Bariery rozwoju rynku biomasy w Polsce, od lat pozostają nie zmienione. Według Grzybek (2007) i Zawitowskiego (2007) do zasadniczych trudności należy:

- brak prognoz nt. udziału biomasy z lasów (drewna), która może potencjalnie być przeznaczona na cele energetyczne w perspektywie do 2020 r. Symulacje przeprowadzone przez Płotkowskiego (2007) wg trzech scenariuszy wskazują, że wielkości biomasy drzewnej, którą można przeznaczyć na cele energetyczne waha się od 11 do blisko 16 mln m³. Wyliczone wartości mają jednak charakter teoretyczny i po uwzględnieniu tzw. dostępności technologiczno-technicznej zmniejszają się do 3-5 mln m³,
- lokalne i trudne do zbilansowania wykorzystanie pozostałości z przerobu drewna, stałych odpadów przemysłowych np. z przemysłu papierniczego, drzewnego, meblarskiego oraz drewna pochodzącego z recyklingu,
- rozproszenie pozostałych potencjalnych źródeł biomasy takich jak drewno z sadów, produkty rolnicze oraz odpady organiczne. Brak rynku biomasy rolniczej w adekwatnej skali i brak w chwili obecnej producentów gotowych zaoferować jednorazowo większe ilości surowca skutecznie eliminuje ją z obrotu wielkotowarowego,
- niekonkurencyjność i niestabilność powierzchni upraw biomasy rolniczej; zasób tej biomasy uzależniony jest od wielkości powierzchni produkcyjnych (plony biomasy) oraz stosunku cen do podstawowych płodów rolnych przeznaczonych do celów konsumpcyjnych i na pasze dla zwierząt (buraków cukrowych, rzepaku, pszenicy). W sytuacji, gdy koszt produkcji biopaliw jest na ogół wyższy od ceny paliw kopalnych, zwiększenie udziału biopaliw może być uzyskane dzięki aktywnej polityce fiskalnej wspomagającej wdrażanie wykorzystania biomasy,
- duże ryzyko techniczno-organizacyjne związane z szerszym wprowadzeniem biomasy do energetyki, ciepłownictwa i produkcji paliw płynnych. Do podstawowych problemów zaliczyć tu trzeba skomplikowane zaopatrzenie i logistykę, niestabilne

prawodawstwo, nikłe wsparcie władz administracyjnych, problemy technologiczne (kwestia lokalizacji instalacji, uziarnienia i innych cech fizycznych biomasy, korozja, erozja czy pogorszenie sprawności kotłów, niestabilność składu paliwa).

Rosnące zapotrzebowanie na biomasę stałą, dominującą w strukturze nośników energii oznacza, że w kolejnych latach nabierać będzie na znaczeniu organizacja systemu pozyskania i transportu wzrastających ilości biomasy od producentów do przetwórców. Są nimi głównie lokalne ciepłownie i elektrociepłownie oraz elektrownie zawodowe. Chociaż w zamyśle wykorzystania biomasy było jej lokalne przetworzenie, to coraz częściej jest ona transportowana na znaczne odległości. Duże elektrociepłownie systemowe nie są w stanie zaopatrzyć się w niezbędny surowiec na poziomie lokalnym, dlatego sprowadzają go niejednokrotnie z odległości kilkuset km (Gostomczyk, 2012).

Uwarunkowania przedstawione powyżej uzasadniają przeprowadzenie ciągłych analiz nad bilansem biomasy energetycznej zestawiającym w ujęciu lokalnym potencjalny popyt i możliwą podaż. Podjęcie szerokich badań nad modelem sieci logistycznej rynku biomasy powinno stanowić narzędzie zapewniające bezpieczeństwo dostaw biomasy do obiektów spalania i gwarantujących odbiór biomasy od producentów i jednocześnie ułatwić podejmowanie długofalowych decyzji inwestycyjnych, zarówno po stronie zakładów energetycznych (modernizacje, zakup technologii), jak i po stronie producentów biomasy.

Dlatego za uzasadnione wydaje się przeprowadzenie analiz nt. produkcji i wykorzystania biomasy. Wstępne badania wskazują, iż wzrost znaczenia upraw energetycznych i biomasy spowoduje rozwój technologii pozyskiwania, logistyki, składowania i przetwarzania biomasy na różnorodne produkty energetyczne. Należy przewidywać, iż w najbliższych latach znacznie wzrośnie ze strony zakładów petrochemicznych, energetycznych i elektrociepłowni zapotrzebowanie na biomasę co spowoduje konieczność opracowania sprawnych systemów (sieci), które będą zajmować się gromadzeniem (transport i zbiór), wstępnym przetwarzaniem oraz magazynowaniem biomasy (Baum i in., 2012).

6.2. Technologia zbioru a technika i technologia prac transportowych

Na organizację systemu logistycznego biomasy energetycznej składają się czynności zarówno po stronie producentów biomasy jak i jej przetwórców. W pozyskaniu biomasy podstawowe znaczenie ma technologia zbioru. Ze względu na ogromną masę jest to czynność bardzo pracochłonna i podstawowy element kosztów pozyskania biomasy (Kuboń, 2010).

Dobór technologii zbioru roślin energetycznych zależy od ich rodzajów. Krzewy i drzewa szybko rosnące, do których można zaliczyć wierzbę wiciową, różę wielokwiatową, topolę i robinie akacjową, można zbierać jedno- lub dwuetapowo w cyklach jednorocznych lub częściej w wieloletnich (Lisowski, 2006; Faber i in., 2010). Krzewy: róża wielokwiatowa i robinia akacjowa, oraz byliny (ślazowiec pensylwański, słonecznik bulwiasty) i trawy wieloletnie (miskant, proso różgowate, spartina periowa, palczatka Gerarda) i móżga trzcinowata można również zbierać jedno- lub dwuetapowo, ale wyłącznie w cyklu jednorocznym (tab. 6.2.1).

Tabela 6.2.1. Technologie zbioru roślin energetycznych i maszyny robocze

Sposób zbioru		Drzewa krótkiej rotacji (topola, wierzba) i krzewy (róża wielokwiatowa, robinia akacjowa, wierzba).	Trawy (miskant, proso różgowe, spartina preriowa, móżga trzcinowata, palczatka Gerarda) i byliny (ślazowiec, słonecznik bulwiasty).
Jedno- etapowo	Cykl: 1-letni	Wierzba, krzewy: sieczkarnie ciągnikowe zawieszane, przyczepiane lub samojezdne z przystawką do zbioru kukurydzy, najlepiej bezrzędową (Kemper, Krone).	Sieczkarnie ciągnikowe zawieszane, przyczepiane lub samojezdne z przystawką do zbioru kukurydzy, rzędową lub bezrzędową.
	Cykl: 2-5-letni	Wierzba: sieczkarnie ciągnikowe przyczepiane lub samojezdne ze specjalną przystawką.	
	Transport	Przyczepy objętościowe ciągnikowe lub samochody ciężarowe.	Przyczepy objętościowe ciągnikowe lub samochody ciężarowe.
Dwu- etapowo	Ścinanie; cykl 1-letni	Sekatory, Wykaszarki spalinowe, Kosiarki ciągnikowe z piłą tarczową, Maszyny specjalne ścinające i wiążące lub przyzmużające, Maszyny ścinająco-prasujące.	Kosiarki rotacyjne (z kondycjonerem), ciągnikowe lub samojezdne.
	Ścinanie; cykl 2-5-letni	Wierzba: jak dla cyklu 1-letniego, plus pilarki spalinowe.	
	Ścinanie; cykl 5-30-letni	Topola: maszyny leśne; ścinacze grupujące ($\leq \varnothing 150$ mm), harwestery ($> \varnothing 150$ mm).	
	Prasowanie / zbiór		Prasy zwijające, tłokowe wielkogabarytowe, Przyczepy zbierające.
	Załadunek i rozładunek	Ręczny, Ładowarki czołowe lub chwytakowe, Forwordery lub skidery chwytakowe.	Ładowarki czołowe lub chwytakowe do bel.
	Transport	Przyczepy ciągnikowe lub samochody, Przyczepy leśne.	Przyczepy ciągnikowe lub samochody, Przyczepy samoładownicze.
	Rozdrabnianie	Rębaki do drewna, Urządzenia zrębkujące.	Szarpacze do słomy, Rozdrabniacze nożowe.

Źródło: Lisowski, 2010

Zbiór jednoetapowy polega na jednoczesnym ścinaniu roślin i rozdrabnianiu, najczęściej przy zastosowaniu sieczkarni polowej – ciągnikowej lub samojezdnej. Logiczną konsekwencją jest więc, że jest to równocześnie zbiór roślin w postaci zrębków (krzewy

i drzewa) lub siewki (trawy i byliny). Do zbioru materiału w takiej postaci wykorzystuje się zestawy transportowe składające się z samochodu z kontenerem wymiennym lub też zestawów ciągnikowych z przyczepami objętościowymi.

Jak już wcześniej wspomniano, zbiór całych pędów w cyklach jednorocznych wykonuje się z użyciem takich maszyn jak: żniwiarki, wiązałki (Bundler firmy Salix Maskiner) oraz specjalnie do tego celu skonstruowane maszyny zagregatowane z ciągnikiem, maszyny ścinająco-prasujące lub samojezdne. Technologie bezpośredniego zbioru wierzby na zrębki, przy zastosowaniu obecnych maszyn na odpowiednio dużych plantacjach, są tańsze niż techniki dwuetapowe zbioru, w postaci całych łodyg (Styles i in., 2008). Do wad jednoetapowej technologii zbioru wierzby można zaliczyć wysokie koszty początkowe dotyczące zakupu maszyn i przechowywania wilgotnych zrębków (Pasyniuk, 2008). Technologie zbioru całych łodyg są bardziej elastyczne, ze względu na mniejsze ograniczenia warunków zbioru i mogą przynieść korzyści, które wynikają z mniejszych kosztów, możliwości naturalnego suszenia, (Harders, 2002).

Technologia zbioru, jak również rodzaj i postać ładunku wymusza na producentach rolnych dopasowania odpowiednich technik i technologii prac transportowych. Przede wszystkim rodzaj i postać ładunku, a także jego właściwości mają decydujący wpływ na odpowiedni dobór środków transportowych. Od rodzaju przewożonego ładunku zależy jego tzw. podatność transportowa. Jest to stopień i odporność ładunku na warunki i czas transportu. Zależnie od przewożonego ładunku ta odporność może być mniejsza lub większa. Przykładem ładunków odpornych na trudne warunki transportu jest np. drewno kawałkowe, które w zasadzie nie wymaga przygotowania do transportu. Istnieje jednak wiele ładunków, które wymagają przygotowania do transportu, najczęściej poprzez zastosowanie specjalnych opakowań lub specjalizowanych nadwozi. Takie ładunki charakteryzują się niższą podatnością transportową (zrębki, wióry, pelety, brykiet). Na ogólną odporność transportową składają się trzy rodzaje odporności cząstkowej: podatność naturalna, techniczna i ekonomiczna.

Podatność naturalna wynika z fizykochemicznych oraz biologicznych właściwości przewożonego ładunku. Są to przede wszystkim: stan skupienia, gęstość, własności mechaniczne (wytrzymałość, twardość, sprężystość). Im niższa jest podatność naturalna ładunku, tym większe wymagania względem środków transportowych i organizacji całego procesu transportowego. Dotyczy to przede wszystkim rodzaju opakowań, nadwozi i maszyn przeładunkowych, a także warunków przewozu.

Podatność techniczna dotyczy rozmiarów przestrzennych, wielkości, kształtu i ciężaru przewożonych ładunków. Można ją zwiększać poprzez zastosowanie tzw. opakowań transportowych.

Istotnym parametrem ładunków występujących w postaci sypkiej lub zbrylonej jest tzw. gęstość nasypowa, która wyraża się ilorazem masy materiału i zajmowanej przez niego objętości (bez ugniatania). Gęstość nasypowa jest mniejsza niż gęstość materiału, ponieważ pomiędzy jego kawałkami występują wolne przestrzenie. Przykładowo gęstość usypowa sprasowanej słomy wynosi 90-165 kg·m⁻³, zrębków drzewnych 250-350 kg·m⁻³, a ziarna zbóż 400-750 kg·m⁻³ (Tymiński, 1997). Wartość gęstości nasypowej zależy od stopnia rozdrobnienia ładunku, wilgotności oraz intensywności ugniatania podczas ładowania. Należy to uwzględnić podczas załadunku pojazdów, aby nie doszło do ich przeciążenia.

Podatność ekonomiczna jest związana z wartością ładunku i jest tym większa, im mniejsza jest wartość ładunku. W celu zwiększenia podatności ekonomicznej ładunek zabezpiecza się przed uszkodzeniem, zepsuciem, zagubieniem lub kradzieżą.

Podział biomasy ze względu na jej pochodzenie został zawarty w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 14 sierpnia 2008 roku (Dz.U. 2008, Nr 156 poz. 969). Ze względu na źródła pochodzenia wyróżnia się następujące rodzaje biomasy:

1. Biomasa pochodzenia drzewnego (dendromasa):
 - biomasa z krzewów,
 - biomasa z drzew szybko rosnących liściastych i iglastych,
 - odpady i pozostałości pochodzące z przemysłu przetwarzającego biomasę drzewną.
2. Biomasa pochodzenia rolniczego (agromasa):
 - biomasa z odpadów i pozostałości produkcji roślinnej,
 - biomasa z upraw roślin energetycznych,
 - biomasa z odpadów produkcji rolno-spożywczej,
 - biomasa pochodząca z pozostałych odpadów biodegradowalnych.
3. Biomasa pochodzenia zwierzęcego (zoomasa):
 - odchody zwierzęce stałe i płynne (obornik, gnojowica),
 - odpady uboczne z uboju zwierząt (np. treści żołądkowe),
 - produkty z przetwórstwa zwierzęcego (np. tłuszcze).

Podstawowym źródłem biomasy pozyskiwanej z produkcji roślinnej jest słoma zbóż i innych roślin uprawnych. Ważną rolę wśród potencjalnych zasobów biomasy odgrywają także uprawy energetyczne, do których zalicza się: krzewy i drzewa szybko rosnące (wierzba energetyczna, róża wielokwiatowa, robinia akacjowa, topola, klon jesionolistny), byliny trwałe (ślazowiec pensylwański, topinambur, rożnik przerośnięty, rdestowiec sachaliński), trawy wieloletnie (możga trzcinowata, miskant olbrzymi i cukrowy, palczatka Gerarda, spartina preriowa, proso różgowe) rośliny jednoroczne (kukurydza energetyczna, burak energetyczny, rzepak energetyczny, żyto energetyczne) i inne (Majtkowski, 2007; Stolarski i in., 2007; Terlikowski, 2012).

W Unii Europejskiej w strukturze energii pierwotnej pozyskiwanej ze źródeł odnawialnych, 67% stanowi energia wytwarzana z biomasy, w tym 48,1% biomasa drzewna (rys. 6.2.1). Drewno jako podstawowe źródło biomasy w Polsce występuje jako: opał drzewny, odpady i produkty uboczne przemysłu leśnego i meblowego oraz odpady drzewne powstające w miastach.

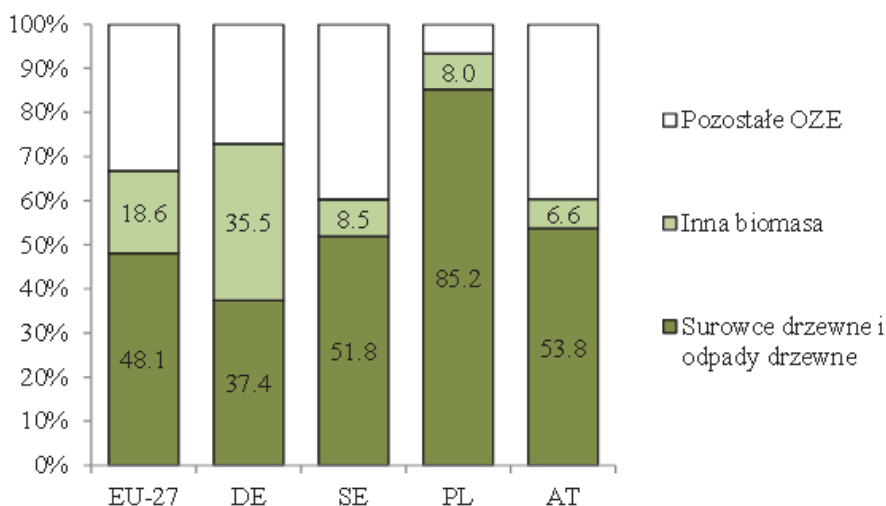
W zależności od stopnia przetworzenia i odległości transportu do ich przewozu wykorzystuje się specjalistyczne zestawy transportowe (rys. 6.2.2.a,b) przeznaczone do przewozu drewna całego (przyczepy lub naczepy dłuźycowe) lub kawałkowego (przyczepy lub naczepy skrzyniowe lub platformowe), a do odpadów leśnych, upraw niektórych roślin energetycznych oraz odpadów drzewnych zestawy do przewozów ładunków objętościowych (wywrotki – rys. 6.2.2.c, kontenery otwarte – rys. 6.2.2.d, nadwozia wymienne – rys. 6.2.2.e).

Ze względu na dużą objętość biomasy leśnej występującej w formie odpadów leśnych lub drzewnych, konieczne jest jej wstępne rozdrobnienie do postaci zrębków. Przewóz ich odbywa się najczęściej transportem drogowym, samochodami ciężarowymi z przyczepami, lub kontenerami wymiennymi, które mogą przewieźć jednorazowo około 80 m³ biomasy.

Załadunek środków odbywa się bezpośrednio z maszyny bazowej lub wykorzystuje się to tego celu ładowarki czołowe (rys. 6.2.3.a,b).

Według Piotrowskiego (2004), zrębki drzewne mogą być transportowane samochodem do 250 km zanim energia transportu zrówna się wielkością z wydzieloną energią (kryterium opłacalności). Odpowiadający dystans dla zestawów ciągnikowych wynosi 100 km, transportu kolejowego – 500 km a transportu promowego – 1000 km.

Ogólnie, należy dążyć do skracania odległości transportowych, a tym samym minimalizowania kosztów transportu. Przykładowo w Szwecji średnia odległość transportu biomasy do zakładu przetwórczego dużej skali (produkcja elektryczności lub metanolu o możliwości przerobu 300 tys. ton suchej biomasy rocznie) wynosi około 30 km. Biorąc pod uwagę tempo zużytkowania zasobów biomasy i szacunkowe prognozy na najbliższe lata - zakładające wzrost potencjału biomasy do poziomu 220-1015 J na rok - średnia opłacalna droga transportu wynosić będzie około 42 km. Koszt transportu biomasy na odległość 30-42 km będzie równoważny około 20-25% kosztów samej biomasy, a całkowita efektywność produkcji zwiększy się do 95-97%.



Źródło: Eurostat, 2011

Rysunek 6.2.1. Struktura produkcji energii pierwotnej ze źródeł odnawialnych w wybranych krajach Unii Europejskiej



Źródło: http://www.zednia.bialystok.lasy.gov.pl/aktualnosci/-/asset_publisher/1M8a/content/biomasa-drzewna-alternatywne-zrodlo-energii#.U6bFsyj1QXQ; <http://www.drewno.pl/gieldadrzewna/>

Rysunek 6.2.2. Środki transportowe do przewozu biomasy drzewnej

a)



b)



Źródło: <http://www.multipino.pl>; <http://www.zaklad-zieleni.com.pl/oferta-beast-2680>

Rysunek 6.2.3. Sposoby załadunku: a) bezpośredni załadunek z maszyny rozdrabniającej, b) ładowarka czołowa wykorzystywana do załadunku środków materiałem rozdrobnionym

Podobne badania wykonywali Juliszewski, Kwaśniewski i Kuboń (2004) przeprowadzając teoretyczne rozważania dotyczące oszacowania kosztów transportu, na różne odległości, jednostki energii zawartej w tradycyjnych nośnikach energii i biomase. Analiza dotyczyła jedynie kosztów transportu (przewozu nośników energii) na różne odległości, a celem pracy była odpowiedź na pytanie – jakie są relacje kosztów przewozu jednostki energii ($\text{zł} \cdot \text{GJ}^{-1}$) zawartej w węglu kamiennym, oleju opałowym do kosztów przewozu zrębków wierzby energetycznej lub słomy prasowanej z gospodarstwa rolnego do ciepłowni? Symulacja kosztów przewozu została przeprowadzona przy założeniu pełnej mechanizacji przy czynnościach za- i wyładunkowych. Do symulacji kosztów transportu założono cztery warianty (sposoby) przewozu tradycyjnych nośników energii i biomasy:

Wariant A – ciągnik rolniczy i rozrząsacz obornika,

Wariant B – ciągnik rolniczy i jedna przyczepa,

Wariant C – ciągnik rolniczy i dwie przyczepy,

Wariant D – samochód ciężarowy.

Na podstawie badań (Kuboń, 2001), dla każdego zestawu przyjęto jednostkowe koszty transportu (przy rzeczywistym wykorzystaniu środków transportowych w gospodarstwie) oraz koszty przewozu jako usługa pobrana z zewnątrz gospodarstwa. Założono średnie prędkości transportowe uwzględniające różne nawierzchnie dróg po których transportowane będą wybrane nośniki energetyczne. Dane wykorzystane do obliczeń przedstawiono w tabeli 6.2.2.

W tabeli 6.2.3 przedstawiono wartości energetyczne wybranych nośników energii, możliwe do przewiezienia wyżej wymienionymi zestawami transportowymi, przy założeniu ich pełnej ładowności. Przykładowo – wykorzystując do transportu ciągnik U3512 i przyczepę T604 możemy przewieźć teoretycznie 82,6 GJ węgla kamiennego, 36,6 GJ zrębków wierzby energetycznej o wilgotności 20% i tylko 8,9 GJ słomy prasowanej w kostkach. Z kolei zastępując zestawy ciągnikowe samochodem ciężarowym Star 1142 możemy przewieźć teoretycznie 289 GJ węgla kamiennego, 128,1 GJ zrębków wierzby energetycznej o wilgotności 20% i tylko 31,1 GJ słomy prasowanej w kostkach.

Tabela 6.2.2. Sposoby przewozu oraz dane przyjęte do symulacji

Zestaw transportowy	Typy	Ładowność		Przyjęty koszt transportu	Przyjęty koszt usługi	Założona średnia prędkość przewozu
		(t)	(m ³)	(zł·h ⁻¹)		(km·h ⁻¹)
Ciągnik + roztrząsacz	U3512+N235	3,5	3,4	35	33	12
Ciągnik + 1 przyczepa	U3512+T604	4	4	40	33	15
Ciągnik + 2 przyczepy	U3512+D737	8	9	49	38	15
Samochód ciężarowy	STAR 1142	6,5	14	95	52	50

Źródło: Juliszewski i in., 2004

Tabela 6.2.3. Wartość energetyczna nośników energii możliwa do przewiezienia założonymi środkami transportowymi GJ (m³)

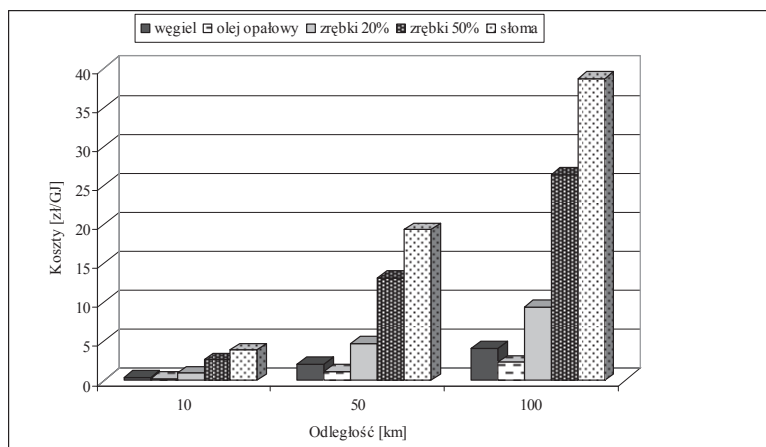
Rodzaj środka transportowego	Nośniki energii				
	Węgiel kamienny	Olej opałowy	Zrębki wierzby*	Zrębki wierzby**	Słoma prasowana
Roztrząsacz obornika	70,2	125,7	31,1	11,1	7,5
Przyczepa	82,6	147,9	36,6	13,0	8,9
Dwie przyczepy	185,8	332,8	82,4	29,3	20,0
Samochód ciężarowy	289,0	517,7	128,1	45,6	31,1

Źródło: Juliszewski i in., 2004

Symulację kosztów przewozu jednostki energii (zł·GJ⁻¹) zawartej w tradycyjnych nośnikach energii i biomase wykonano dla trzech założonych odległości przewozu: 10, 50 i 100 km. Wyniki symulacji przewozu z wykorzystaniem własnych środków transportowych oraz przewozu jako usługa pobierana (zakupiona) przedstawiono w tabeli 6.2.4.

Analizując uzyskane wyniki należy stwierdzić, że dla wszystkich założonych wariantów, koszty przewozu jednostki energii zawartej w paliwach z biomasy, na większe odległości (50, 100 km), są zdecydowanie wyższe niż koszty przewozu tradycyjnych nośników energii. Przykładowo, na rys. 6.2.4. pokazano koszty przewozu jednostki energii (zł·GJ⁻¹) własnym środkiem transportowym na założone odległości dla zestawu – ciągnik rolniczy i jedna przyczepa (wariant B1).

Wariant ten jest najczęściej spotykany w gospodarstwach rolnych jako typowy zestaw transportowy. Wykorzystując ten zestaw koszt transportu jednostki energii, na odległość 10 km, dla słomy prasowanej wynosi 3 zł·GJ⁻¹, a na odległość 100 km wzrasta 10-krotnie i wynosi 30 zł·GJ⁻¹. Z kolei dla wierzby energetycznej mającej 20% wilgotności relacje te wynoszą 0,73 i 7,29 zł·GJ⁻¹. Natomiast dla węgla kamiennego koszt transportu jest najniższy i wynosi odpowiednio 0,32 i 3,23 zł·GJ⁻¹.



Źródło: Juliszewski i in., 2004

Rysunek 6.2.4. Koszty przewozu własnym środkiem transportu jednostki energii (zł·GJ⁻¹) na założone odległości dla wariantu B1 (ciągnik rolniczy i jedna przyczepa)

Tabela 6.2.4. Porównanie kosztów przewozu jednostki energii na założone odległości

Nośniki energii		Odległość przewozu (km)	Wariant							
			A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
			(zł·GJ ⁻¹)							
Tradycyjne	węgiel kamienny	10	0,42	0,39	0,32	0,27	0,18	0,14	0,07	0,04
		50	2,08	1,96	1,61	1,33	0,88	0,68	0,33	0,18
		100	4,16	3,92	3,23	2,66	1,76	1,36	0,66	0,36
	olej opałowy	10	0,23	0,22	0,18	0,15	0,10	0,08	0,04	0,02
		50	1,16	1,09	0,90	0,74	0,49	0,38	0,18	0,10
		100	2,32	2,19	1,80	1,49	0,98	0,76	0,37	0,20
Biomasa	zrębki wierzby (20%)	10	0,94	0,88	0,73	0,60	0,40	0,31	0,15	0,08
		50	4,69	4,42	3,64	3,01	1,98	1,54	0,74	0,41
		100	9,38	8,84	7,29	6,01	3,97	3,08	1,48	0,81
	zrębki wierzby (50%)	10	2,63	2,48	2,05	1,69	1,11	0,86	0,42	0,23
		50	13,17	12,42	10,24	8,45	5,57	4,32	2,08	1,14
		100	26,35	24,84	20,48	16,89	11,15	8,65	4,17	2,28
	słoma prasowana	10	3,86	3,64	3,00	2,48	1,63	1,27	0,61	0,33
		50	19,32	18,22	15,02	12,39	8,17	6,34	3,06	1,67
		100	38,64	36,43	30,03	24,77	16,35	12,68	6,11	3,35

Oznaczenia przyjętych wariantów:

- | | | | |
|---------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|
| 1) Własny transport | A1 - ciągnik + roztrząsacz | 2) Usługa pobierana | A2 - ciągnik + roztrząsacz |
| | B1 - ciągnik + 1 przyczepa | | B2 - ciągnik + 1 przyczepa |
| | C1 - ciągnik + 2 przyczepy | | C2 - ciągnik + 2 przyczepy |
| | D1 - samochód ciężarowy | | D2 - samochód ciężarowy |

Źródło: Juliszewski i in., 2004

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono m. in., że koszt transportu jednostki energii zawartej w słomie prasowanej jest 9,3 razy większy niż koszty transportu węgla kamiennego. Przyczyną różnic pomiędzy kosztami transportu tradycyjnych nośników energii i biomasy są: niska wartość opałowa oraz niska masa usypowa zrębków wierzby i słomy. Skutkiem tego jest konieczność operowania większymi objętościowo ilościami zrębków czy słomy, aby dostarczyć w paliwie taką samą ilość energii jak przy paliwach tradycyjnych. Przykładowo: aby zapewnić taką samą wartość energetyczną jaką ma węgiel kamienny należy dostarczyć:

- 2,3 razy więcej zrębków wierzby energetycznej o wilgotności 20%,
- 6,3 razy więcej zrębków wierzby energetycznej o wilgotności 50%.

W celu zorganizowania przewozu biomasy (zrębki wierzby, słoma), szczególnie na duże odległości od miejsca jej pozyskiwania, niezbędne są specjalne środki transportowe, przystosowane do przewozu wielkich objętości, a także konieczność posiadania odpowiedniego sprzętu do ich obsługi. Natomiast uzyskane wyniki pozwalają wnioskować, że transport biomasy na duże odległości z wykorzystaniem tradycyjnych środków transportowych jest inwestycją nieopłacalną (kosztowną) i czasochłonną.

Zbiór roślin energetycznych odbywa się najczęściej jesienią lub zimą. Niestety podczas tego okresu w większości regionów utrzymują się złe warunki pogodowe i duża wilgotność gleby czyni ją grząską. Śnieg pokrywający pola i zalegający między kępami roślin lub pozostający na łąkach i liściach traw jest również czynnikiem wpływającym na decyzje o rozwiązaniach technicznych stosowanych w technologiach zbioru. W takich warunkach konieczne jest zastosowanie gąsienicowych układów jezdnych lub szerokich opon. Zależnie od zastosowanej technologii i mechanizmu tnącego, śnieg może być również zabierany przez biomasę i trafiać do zespołu rozdrabniającego, a dalej ze zrębkami na skrzynię środka transportowego (Pellerin i in., 1999; Boyd i in., 2000).

Zbiór roślin w postaci rozdrobnionej jest zalecany na dużych plantacjach i tam, gdzie jest dobrze rozwinięty rynek zbytu, z możliwością wykorzystania biomasy do współspalania w przemysłowym spalaniu węgla (Gera i in., 2002). Rozdrobniony materiał roślinny w zespole roboczym sieczkarni polowej może stanowić surowiec do dalszej przeróbki w produkcji brykietów lub peletów. Konieczne jest dodatkowe rozdrobnienie zrębków lub sieczki, jakie uzyskuje się z sieczkarni (Bitra i in., 2008). Są one zbyt duże, aby można było wyprodukować trwałe brykiety lub pelety. Odbiór i transport zrębków, w zależności od odległości do punktów składowania lub zbytu może odbywać się zestawami ciągnikowymi lub samochodami współpracującymi z przyczepami objętościowymi lub kontenerami wymiennymi (rys. 6.2.5.).

Według Lisowskiego (2010) do zbioru traw i bylin można wykorzystać te same techniki, jak dla roślin zielonych nisko- i wysokołodygowych. Na rys. 6.2.6 przedstawiono technologie zbioru traw lub bylin.

Zespoły ścinające maszyn zbierających powinny być ustawione na najmniejszej możliwej wysokości koszenia, aby uniknąć strat, ale nie za niskiej, aby nie zbierać kamieni lub ziemi, zanieczyszczającej materiał słomisty. Straty materiału podczas zbioru roślin mogą osiągnąć nawet 50-60% (mozga trzcinowata), ze względu na małą gęstość właściwą zwłaszcza wówczas, gdy materiał jest rozdrobniony na sieczkę.

a)

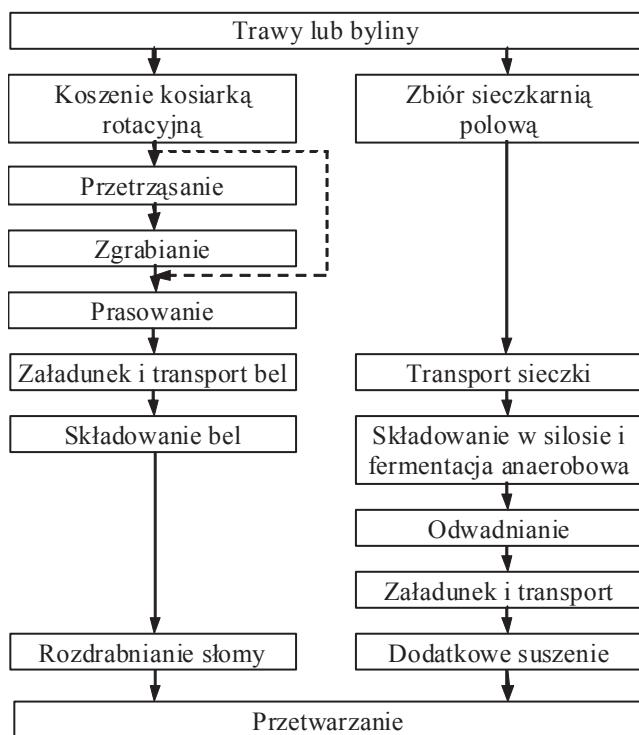


b)



Źródło: <http://www.ambrozy.com.pl/jaguar-900-830>

Rysunek 6.2.5. Odbiór biomasy w postaci rozdrobnionej a) samochód z kontenerem wymiennym, b) zestaw ciągnikowy z podniesionymi burtami



Źródło: Lisowski i in., 2010

Rysunek 6.2.6. Technologie zbioru traw lub bylin

Uwzględniając wymagania odbiorów ze strony energetyki lokalnej i zawodowej, do zbioru traw o małej zawartości wilgoci, np. miskanta, stosuje się także rozwiązania polegające na ścinaniu roślin z pnia i prasowaniu od razu materiału za pomocą prasy wielkogabarytowej (rys. 6.2.7.a,b).

a)



b)



Źródło: Lisowski i in., 2010

Rysunek 6.2.7. Ścinanie roślin miskanta z jednoczesnym prasowaniem: a – ścinanie roślin na pokos i jego podbieranie prasą wielkogabarytową, b – ścinanie i rozdrabnianie roślin sieczkarnią i prasowanie siewki zmodyfikowaną prasą wielkogabarytową

Z powodu małej gęstości nasypowej, transport materiału z niektórych roślin jest ekonomicznie uzasadniony tylko na małą odległość, mniejszą niż 80 km, a przy mniejszej ładowności środków transportowych, nawet do 40 km. Słoma luzem ma bowiem gęstość nasypową $20\text{--}50\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, a pocięta $40\text{--}60\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, w zależności od wilgotności i rodzaju rośliny. Zbieranie materiału słomistego za pomocą pras wysokiego stopnia zgniotu lub zwijających pozwala na dwukrotne zwiększenie jego gęstości w belach w zakresie $80\text{--}140\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Bele prostopadłościennne mają optymalny kształt w porównaniu z okrągłym i ze względów ekonomicznych bardziej nadają się do transportu na większe odległości. Ich wymiary z reguły stanowią pochodną szerokości skrzyń ładunkowych samochodów ciężarowych tj. 2,4 m. Prostopadłościenny kształt zapewnia równy i stabilny załadunek pojazdu, oraz w miarę pełne wykorzystanie przestrzeni ładunkowej. Podobnie przedstawia się sytuacja w przypadku transportu bel okrągłych – dla różnych średnic bel różny będzie stopień wykorzystania przestrzeni ładunkowej.

Ładowność wykorzystywanych platform wynosi zwykle 30–40 prostokątnych bel słomy i łącznej wadze 8–10 ton. W przypadku bel okrągłych o szerokości 120 cm i średnicy 120 lub 150 cm ładowność wynosi 24–40 szt. przy łącznej wadze 5–9 ton.

W tabeli 6.2.5 przedstawiono przykłady wykorzystania środków transportowych w zależności od rodzaju ładowanych bel słomy, przy założonym stopnia zagęszczenia wynoszącym $120\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.



b)



a)

Źródło: <http://wielun.lento.pl/transport-słomy-siana,1001576.html>; <http://www.europaciezarowki.pl/zdjecia-naczepa-trailor-platforma/do-transportu-słomy.html>

Rysunek 6.2.8. Przewóz bel cylindrycznych (a) i prostokątnych (b) transportem samochodowym

Tabela 6.2.5. Masa ładunku w tonach w zależności od formy ładowanej słomy i siana (przy gęstości bel $120 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

Wyszczególnienie	Bele prostokątne o wysokości				Bele okrągłe o średnicy	
	70 cm	80 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
Rodzaj pojazdu/ wysokość, średnica bel						
Samochód z naczepą 12 m	9,6	11,2	9,3	6,4	8,0	8,8
Samochód ciężarowy z przyczepą	12,5	14,6	12,1	7,7	9,0	10,4
Ciągnik rolniczy z przyczepą	7,7	9,0	7,4	5,1	6,0	7,4
Ciągnik rolniczy z dwoma przyczepami	9,6	11,2	9,3	6,4	8,0	8,8

Źródło: Gradziuk i Kościak, 2007

Z danych zawartych w powyższej tabeli wynika, że różnice w wielkości rzeczywistego ładunku dla tych samych pojazdów sięgają nawet 15-25%. Z tego też powodu istotny jest dobór optymalnych środków transportu do przewozów określonego rodzaju bel słomy i siana. Powyższe uwarunkowania w bardzo istotny sposób wpływają również na jednostkowe koszty transportu słomy. Dla przyjętych wyżej ładowności i odległości transportu podzielonej na siedem stref, koszt przewozu jednej tony słomy zawiera się w granicach od około $7,50 \text{ zł}\cdot\text{t}^{-1}$ do $40,10 \text{ zł}\cdot\text{t}^{-1}$ dla wielkogabarytowych bel prostokątnych i od $9,85 \text{ zł}\cdot\text{t}^{-1}$ do $56,30 \text{ zł}\cdot\text{t}^{-1}$ dla bel okrągłych. Koszty transportu dla poszczególnych stref zestawiono w tabelach 6.2.6 i 6.2.7 przy założeniu że: stawka za 1 km pojazdu samochodowego wynosi 2,00 zł, pojazdu samochodowego z przyczepą – 2,50 zł, godzina pracy ciągnika z przyczepą – $30,00 \text{ zł}\cdot\text{h}^{-1}$, a z dwoma przyczepami – $35,00 \text{ zł}\cdot\text{h}^{-1}$, czas załadunku pojazdu samochodowego lub przyczepy ciągnikowej 30 minut, a rozładunek pojazdu 15 minut.

Tabela 6.2.6. Średni koszt transportu słomy prasowanej
w wielkogabarytowych belach prostokątnych

Rodzaj pojazdu	Samochód z naczepą 12m	Samochód ciężarowy z przyczepą	Ciągnik rolniczy z przyczepą	Ciągnik rolniczy z 2 przyczepami
Odległość (km)	Koszt transport słomy (zł·t ⁻¹) w wielkogabarytowych belach prostokątnych			
10	7,52	7,24	8,47	7,90
20	10,53	10,13	14,74	12,42
30	13,54	13,02	19,75	16,43
40	16,55	15,92	24,77	20,44
60	24,08	23,15	34,80	28,47
80	32,10	30,87	X	X
100	40,13	38,59	X	X
	Koszt transport słomy (zł·t ⁻¹) w wielkogabarytowych belach cylindrycznych			
10	9,85	10,56	11,19	10,34
20	13,79	14,78	14,50	13,40
30	17,72	19,00	18,64	17,23
40	21,66	23,23	22,78	21,06
60	31,51	33,78	31,07	28,72
80	42,01	45,05	X	X
100	52,50	56,31	X	X

Źródło: Gradziuk i Kościk, 2007

Duży wpływ na poziom łącznych kosztów transportu słomy ma dokładne synchronizowanie poszczególnych ogniw logistycznych. Z tego też względu wskazane jest powierzenie ich jednemu podmiotowi. Przy przewożeniu dużych partii, szczególnie na większe odległości, zaleca się wykorzystywać samochody ciężarowe z przyczepami, zabierające jednorazowo do 12 ton słomy. Wpływ na czas transportu wywiera nie tylko masa ładunku, lecz także szybkość transportu i odległość. Organizując przewóz słomy należy zbilansować liczbę środków transportu jak i sprzętu załadunkowego i rozładunkowego w taki sposób, aby umożliwić płynny ruch pojazdów oraz optymalne wykorzystanie ładowacza przy przymie (bez przestojów) (Kuboń, 2010).

Odpady przemysłu przetwórczego (łuski, pestki, wytloki) można przewozić w dużych jednostkach logistycznych – worach zwanych big-bagami o ładowności 0,5-2 ton, specjalnych kontenerach lub nadwoziach wymiennych. Czynności ładunkowe realizowane są z wykorzystaniem własnych urządzeń ładunkowych (HDS) lub ładowaczy chwytakowych (rys.6.2.9.).

a)



b)



Źródło: <http://www.onions-potatoes.com/handling/handling-equipment/handling-equipment-bigbags.php>; <http://www.truck-expo.comnadwozie-wymienne-bdf-g109543625>

Rysunek 6.2.9. Przeładunek towaru: a) zjednostkowanego w big-bagach, b) w nadwoziu wymiennym

W praktyce procesy transportowe mogą być realizowane samodzielnie przez dysponującego ładunkiem (producenta, eksportera bądź importera w ramach tzw. *spedycji własnej*) lub – najczęściej – przez zajmujące się profesjonalnie i zarobkowo tą działalnością przedsiębiorstwo spedycyjne bądź logistyczne. Spedytor (logistyk) jako pośrednik między załadownicami (eksporterami i importerami) a przewoźnikami, działający na zlecenie i reprezentujący interesy tych pierwszych przygotowując i realizując proces transportowy powinien zwracać szczególną uwagę między innymi na:

- opracowanie najkorzystniejszej dla zleceniodawcy koncepcji transportu,
- wybór właściwych podmiotów wykonujących niezbędne usługi,
- terminowe przekazywanie zleceń wykonawcom tych usług,
- wynegocjowanie odpowiednich warunków przewozu i korzystnych cen,
- zabezpieczenie odpowiedniej dokumentacji w przypadku uszkodzenia bądź zagięcia ładunku.

Sprawne funkcjonowanie transportu jako istotnego ogniwa usług logistycznych jest ściśle uzależnione od istniejącej infrastruktury. Infrastruktura transportu determinuje więc możliwości przewozu – tworzenia łańcuchów dostaw – i koszty transportu, a tym samym wpływa na koszty i jakość usług logistycznych. Znaczenie transportu w logistyce obrazuje również struktura kosztów logistycznych. Otóż na koszty transportu przypada zazwyczaj około 45% całości kosztów logistycznych (Kuboń, 2008; Michałek i Kuboń, 2009).

W praktyce przedsiębiorstw sprowadzających biomasę z zagranicy najczęściej występuje sytuacja, w której kontakt ze spedytorem/logistyką nawiązywany jest dopiero w ostatniej fazie kontraktu handlu, tj. w fazie jego realizacji, gdy definitywnie rozstrzygnięta jest już kwestia *gestii transportowej*. Powoduje to, iż wpływ spedytora/logistyka na wybór korzystnej dla zleceniodawcy koncepcji procesu transportowego jest w znacznym stopniu zdeterminowany formułą dostawy przyjętą w kontrakcie handlu zagranicznego. Dlatego za korzystną dla wyboru właściwej formuły dostawy w kontraktach handlu zagranicznego uznać należy sytuację, w której eksporterzy/importerzy nawiązują kontakt ze spedytorem/

logistykiem jeszcze przed rozpoczęciem negocjacji i zawarciem kontraktu, umożliwiając mu tym samym aktywne uczestnictwo w przygotowaniu odpowiedniej formuły dostawy negocjowanego kontraktu handlowego, stanowiącej podstawę wyboru (bądź rezygnacji, jeśli okaże się to uzasadnione) *gestii transportowej*.

6.3. Magazynowanie biomasy

Z punktu widzenia logistyki dostaw biopaliw stałych istotne znaczenie mają zagadnienia związane z dostępnością biomasy w różnych porach roku i zmianami jej wilgotności w zależności od okresu sezonowania (Grzybek i in., 2006). Biomasa rolna, a także znaczna część leśnej, ma określone (stosunkowo krótkie) terminy zbioru, po których może być sprzedana bezpośrednio, jako biomasa świeża o dużej wilgotności lub sezonowana, albo przetwarzana na granulaty. Z drugiej strony przedsiębiorstwa energetyczne mają ograniczone możliwości magazynowania paliwa, w związku z tym muszą być one magazynowane przez dostawców.

Magazynowanie biomasy stanowi szczególne wyzwanie dla logistyki. Punkty składowania muszą zapewnić systematyczny przepływ tego surowca od producenta, poprzez punkty składowania, punkty wstępnej obróbki do zakładu energetycznego. Duże zakłady energetyczne oprócz ciągłości dostaw muszą kłaść nacisk na przestrzeganie wymogów przeciwpożarowych, ponieważ składowana biomasa szczególnie narażona jest na to niebezpieczeństwo (np. samozapłon).

Podstawowe decyzje logistyczne w zakresie magazynowania biomasy zarówno przetworzonej jak i nieprzetworzonej dotyczą takich zagadnień jak: miejsce magazynowania, magazyny własne czy obce, liczba i wielkość magazynów własnych oraz wielkość gromadzonych zapasów (Kuboń, 2010; 2011). Jak podaje Juliszewski (2009) biomasa wykorzystywana do celów grzewczych, jak również na cele produkcyjne (produkcja brykietu, pelet) powinna być gromadzona jak najbliżej miejsca spalania lub przetwarzania, w ilości zabezpieczającej ciągłość procesów produkcyjnych lub na okres kolejnych dostaw. Mniejsza gęstość usypowa biomasy w stosunku do paliw konwencjonalnych powoduje większe zapotrzebowanie na pomieszczenia magazynowe, niż dla węgla czy oleju opałowego.

Niezwykle istotną sprawą dla zabezpieczenia trwałości przechowalniczej biomasy jest, aby jej wilgotność nie przekroczyła tzw. wilgotności krytycznej tj. wilgotności przyspieszającej procesy biochemiczne. Intensywne oddychanie i brak wentylacji powoduje przy składowaniu w stogach lub pryzmach znaczny wzrost temperatury oraz doprowadza do samozagrzewania, zaparzenia, gnicia, a nawet samozapłonu ładunku.

W odniesieniu do biomasy leśnej, którą zbiera się na ogół zimą, zaleca się sezonowanie drewna w lesie przez okres miesięcy letnich, zanim zostanie ono zrębkowane i przetransportowane do odbiorcy (Pasyniuk, 2008). Drewno kawałkowe, wałki, „metry” magazynowane jest najczęściej na składach otwartych, ułożone w stosy. Drewno przeznaczone do rozdrobnienia, czyli drewno odpadowe, gałęziówka i czuby powinny być przechowywane do czasu transportu w całości w stertach, a zrębkowanie powinno następować bezpośrednio przed transportem (max. 1-2 dni). Biomasa drzewna pochodząca z upraw wieloletnich, w zależności od terminu zbioru ma wilgotność na poziomie 43-58% (Frączek i in., 2006). Należy ją gromadzić na utwardzonym poboczu drogi lub na placach składowych. Mogą one być zrębkowane od razu na plantacjach, zaraz po zbiorach lub po kilku miesiącach sezo-

wania. Zrębki uzyskane po zbiorach charakteryzują się dużą zawartością wilgoci. Taki materiał nie wymaga specjalnych magazynów, ale w przypadku długiego składowania przyzmy powinny być dobrze zabezpieczone przed opadami atmosferycznymi (np. plandeki lub wiaty). Magazynowanie zrębków o wilgotności powyżej 45% na wolnym powietrzu, w stosach o dużej objętości, jest niekorzystne, gdyż narażone są one na złożone procesy zachodzące wewnątrz stosu (korozja mikrobiologiczna). W przyzmach zrębków obserwuje się brunatnienie i pleśń, pojawiają się różne gatunki grzybów i bakterii (Christine i in., 2004) oraz rośnie temperatura wewnątrz przyzm, nawet do 60°C. W okresie magazynowania, trwającym kilka miesięcy, może nastąpić spadek suchej masy nawet do 15%. Zrębki o wysokiej wilgotności (powyżej 50%) przed okresem magazynowania należy podsuszyć do wilgotności optymalnej (związanej z okresem magazynowania oraz dalszymi etapami technologii ich przetwarzania) (Frączek, i in., 2006; Frączek i Mudryk, 2008; Gigler i in., 2000; 2004).

W celu uzyskania suchego drewna oraz poprawienia jego wartości opałowej biomase wilgotną poddaje się długotrwałemu przechowywaniu (w postaci prętów, gałęzi), tzw. sezonowanie biomasy (Pasyniuk, 2008). Sezonowanie biomasy drzewnej jest jednym z zagadnień, które ma istotny wpływ na efektywność logistyczną wykorzystania biomasy drzewnej w energetyce. Badania Frączka i Mudryka (2008) pokazują, iż w przypadku wierzby energetycznej dla uzyskania najlepszych efektów (jak najniższej zawartości wilgoci), proces sezonowania powinien być prowadzony w okresie wiosenno-letnim (3-4 miesięcy, od marca do czerwca). W ten sposób, bez względu na porę zbioru (wiosna czy jesień) oraz sposób przechowywania (z zadaszeniem, czy bez), w czerwcu zawartość wilgoci w materiale sezonowanym spada poniżej 25%.

Zrębki wierzby krótko przechowywane, powinny być składowane na wyrównanej, utwardzonej powierzchni. Dodatkowo, droga w pobliżu przyzmy powinna być sucha, by składowane zrębki nie były opryskane wodą przez przejeżdżające pojazdy. Zrębki świeżo zebrane składowane w naturalnych warunkach w przyzmi nie wysychają efektywnie, chłoną wodę z opadów atmosferycznych. W przypadku zrębków przechowywanych w dłuższym przedziale czasowym konieczne jest zmniejszenie ich wilgotności, dlatego muszą one być przechowywane w magazynach półzamkniętych (wiaty) lub zamkniętych. Badania wykazały, że przechowywanie zrębków pod dachem przez okres 4-6 miesięcy może zredukować ich wilgotność z około 45% do 30% (Szyber, 2005a,b).

Słomę zbóż, ślazuwca oraz trawy zbiera się w porze letniej i gromadzi w postaci sprasowanej jako bele prostopadłościowe i cylindryczne. Ma ona wówczas wilgotność około 50%. Słomę można przechowywać na polu do kilku miesięcy w postaci stogów (rys. 6.3.1.). Stogi mogą być postawione na gruncie i przykryte od góry, np. plandekami. Podczas takiego przechowywania obserwuje się spadek wilgotności materiału nawet o 10%.

Miskant olbrzymi może być magazynowany w formie stogów przez kilka lat. Zbiera się go wczesną jesienią (wrzesień, październik), kiedy ma najmniejszą wilgotność (około 30%) i najkorzystniejsze właściwości. Po zbiorze może być przechowywana w postaci sprasowanej (jak słoma) lub pocięta na sieczkę i wykorzystana bezpośrednio do spalania, bądź do granulacji. W przypadku miskanta znaczącą poprawę jego właściwości energetycznych (najmniejszą wilgotność) można osiągnąć poprzez opóźnienie zbiorów do końca kwietnia (Faber, 2009). Biomasa miskanta ze zbioru opóźnionego ma wilgotność 20%, a przechowywanie jej w balotach powoduje straty rzędu 10%. Ślazuwca nie poddaje się sezonowaniu. Po zbiorze ma on wilgotność około 27% i powinien być w tej formie dostarczony do odbiorców.

a)



c)



b)



d)



Źródło: <http://www.polprotex.pl/nasza-oferta/wloknina-na-pryzmy/>;
<http://pl.depositphotos.com/891061/stock-photo-straw-bale.html>; <http://www.firmy.net/W6X8,sloma-w-balach-baloty,G2W1.html>

Rysunek 6.3.1. Tworzenie pryzm i składowanie:

a i b – z bel prostokątnych; c i d – z bel cylindrycznych

Przechowywanie mozgi trzcinowatej, ślázowca i miskantusa, zebranych w formie sieczki wymaga zadaszonych magazynów (lub silosów). Składowanie na wolnym powietrzu wymaga zapewnienia odpowiedniego podłoża betonowego lub drewnianego, które zabezpiecza przed podciekaniem wód gruntowych i opadów. Koniecznym zabiegiem jest przykrycie pryzmy sieczki plandeką chroniącą przed rozwiewaniem przez wiatr i wchłanianiem wody z opadów atmosferycznych. Długotrwałe składowanie w postaci sieczki zarówno w magazynie, jak i na wolnym powietrzu, wymaga okresowego przewietrzania przez przemieszczanie hałdy (pryzmy) lub przedmuchiwanie powietrzem. Ponadto, długi czas przechowywania słomy na powietrzu może spowodować obniżenie jej wartości energetycznej. Nie ma to większego znaczenia przy bieżącym zużyciu surowca. Słomę mozgi trzcinowatej można przechowywać w belach, kostkach lub jako sieczkę, jednak

najczęściej materiał jest od razu przetwarzany i przechowywany już w postaci peletów (Pasyniuk, 2008).

Składowanie materiału czynnego biologicznie w hałdach o dużej objętości i dużej wysokości wprowadza duże ryzyko samozapłonu. W przypadku konieczności składowania biomasy w hałdach o wysokości powyżej 4 m (elektrownie, elektrociepłownie), należy prowadzić okresową kontrolę temperatury biomasy wewnątrz hałdy. Generalnie, należy unikać długotrwałego składowania biomasy na otwartym terenie, a w razie takiej konieczności okresowo „przekładać” pryzmę (Kuboń, 2010).

Granulat drzewny (pelety, brykiety) jest paliwem o szczególnych wymaganiach co do warunków jego przechowywania (Pasyniuk, 2008). Magazyny tego paliwa muszą być organizowane w suchych pomieszczeniach, najlepiej całkowicie odizolowanych od wilgoci, zwłaszcza od deszczu, śniegu, wilgotnych ścian oraz skraplającej się pary wodnej. Podłoże magazynu powinno być wykonane z betonu lub asfaltu i nie może zawierać zanieczyszczeń, takich jak ziemia, piasek czy żwir. Suchy granulat może być również przechowywany w zamkniętych silosach. Ciągi transportowe (elementy transportu wewnętrznego) także muszą być przykryte (Duda-Kękuś, 2011).

6.4. Dostawy biomasy na potrzeby energetyki konwencjonalnej

Logistyka biomasy powinna zawierać w sobie szereg procesów współdziałających ze sobą od momentu powstania idei jej wykorzystania poprzez proces planowania inwestycji, realizowania i kontrolowania terminowego i ekonomicznie efektywnego przepływu surowców i materiałów. Ze względu na skalę zapotrzebowania na biomasę w przedsiębiorstwach elektroenergetyki zawodowej, logistyka dostaw musi wykraczać poza procesy wewnętrzne w przedsiębiorstwie i obejmować także działania ukierunkowane na kształtowanie i stabilizację bazy zasobowej (Pudełko i Faber, 2010). Działania takie określa się w tej pracy jako makrologistykę. Konieczność ich podjęcia jest w pełni uświadamiana w koncernach energetycznych działających na terenie Polski, co podkreśla się w wypowiedziach i publikacjach ich przedstawicieli. Z drugiej strony możliwe i konieczne są usprawnienia logistyki wewnętrznej, tj. organizacji dostaw w powiązaniu z identyfikacją bazy zasobowej i wspieraniem jej rozwoju. Dostępne już obecnie środki techniczne, w szczególności systemy informacji przestrzennej GIS (ang. *Geografie Information System*), systemy lokalizacji satelitarnej GPS (ang. *Global Positioning System*) i telefonii komórkowej, umożliwiają prowadzenie logistyki kompleksowej (Faber i in., 2014; Gradziuk, 2008; Panichelli i Gnan-sounou, 2008). Obejmuje ona z jednej strony optymalizację bazy zasobowej, tj. kompleksowe planowanie jej rozwoju wsparte oddziaływaniami na rolnictwo (stosownie do potrzeb przedsiębiorstwa energetycznego), a z drugiej – harmonogramowanie dostaw rocznych, wspierane technikami optymalizacji i minimalizację bieżących kosztów transportu z wykorzystaniem informacji z GIS i GPS.

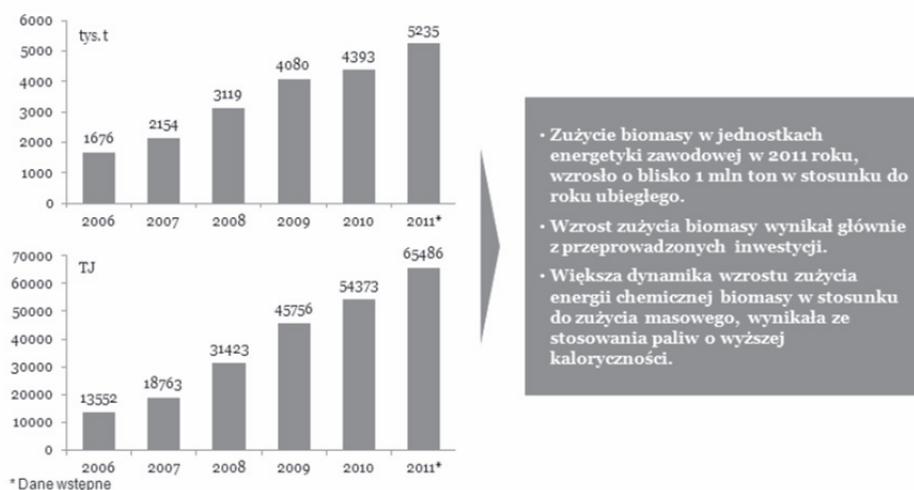
Zgodnie z zobowiązaniami wynikającymi m.in. z pakietu klimatycznego 3x20 wynika, że do 2020 r. Polska ma obowiązek uzyskać 15% udział OZE w zużyciu energii. Dążenie do zwiększenia udziału tych źródeł w bilansie produkcji energii elektrycznej w kraju, ze względu na wysokie koszty inwestycji wymaga stosowania odpowiednich systemów wsparcia, będących gwarancją ich systematycznego rozwoju. Spełnienie tych zobowiązań

wymaga niewątpliwie włączenia do tych działań elektrowni i elektrociepłowni tzw. energetyki zawodowej. Rozporządzenia Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 30 maja 2003 roku w sprawie szczególnego zakresu obowiązku zakupu energii elektrycznej i ciepła z odnawialnych źródeł energii, pokazało prawdziwy obraz rynku biomasy w Polsce, a właściwie jego brak (Grzybek, 2006). Na rys. 6.4.1. przedstawiono zużycie biomasy w energetyce zawodowej w latach 2006-2011, a na rys. 6.4.2. strukturę biomasy zużywanej w energetyce zawodowej.

Wykorzystanie biomasy jako paliwa w systemach energetycznych bez wątpienia przynosi korzyści środowiskowe, jednak w przypadku instalacji opartych wyłącznie na biomase, istnieją obawy dotyczące jakości paliwa oraz stabilności jego dostaw – zasoby biomasy są często rozproszone, jej ilość zależna jest od czynników pogodowych, a infrastruktura do jej dostarczania słabo rozwinięta.

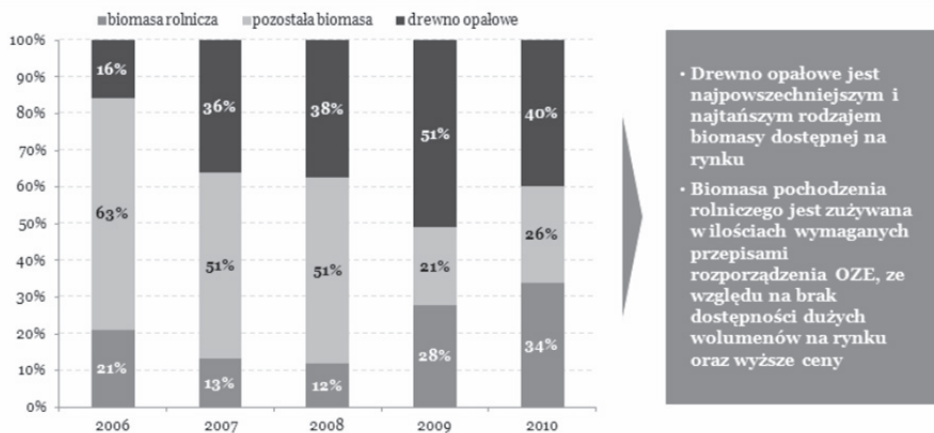
Współspalanie biomasy z węglem w istniejących konwencjonalnych elektrowniach wydaje się być na dzień dzisiejszy rozwiązaniem optymalnym, w których w sąsiedztwie elektrowni znajdują się zasoby odpadowej biomasy. W instalacjach współspalania węgiel jako paliwo zasadnicze stabilizuje system, kompensując okresowe zmiany jakości i ilości biomasy (Rickets, 2002). Koszty operacyjne oraz inwestycyjne współspalania są niższe (Rickets, 2002) niż w systemach opartych wyłącznie na biomase. Dodatkowo współspalanie przynosi wymierne korzyści środowiskowe (Skodras i in., 2004; Benetto i in., 2004).

Nadal jednak istnieje wiele przeszkód utrudniających rozpowszechnianie współspalania. Należą do nich przede wszystkim problemy logistyczne (kosztowny transport i magazynowanie biomasy) oraz problemy techniczne, takie jak: współmielenie i podawanie paliwa do kotła, tworzenie się osadów na powierzchniach wymienników ciepła i elementach kotła (żużlowanie, osady sypkie), spiekanie, oraz korozja (Baxter, 2005; Karki i in., 2005)



Źródło: Agencja Rynku Energii S.A., 2011

Rysunek 6.4.1. Zużycie biomasy w energetyce zawodowej w latach 2006-2011



Źródło: Agencja Rynku Energii S.A., 2011

Rysunek 6.4.2. Struktura biomasy używanej w energetyce zawodowej w latach 2006-2010

Stosowane są różne techniki rozwiązywania powyższych problemów, takie jak zdmuchiwanie osadów, wymiana skorodowanego sprzętu, oczyszczanie złoza fluidalnego, dodawanie związków chemicznych do procesu, wprowadzanie elementów dedykowanej infrastruktury. Jednak większość tych sposobów likwiduje jedynie zaistniałe skutki.

Przedsiębiorstwa energetyczne napotykają na problemy związane z transportem biomasy, a także jej magazynowaniem. W związku z tym preferują dostawy dużymi środkami transportu i w określonym czasie, z niewielkim marginesem zależnym od pojemności magazynów, a jednocześnie wymagają gwarancji dostaw. Na stronie www.vattenfall.pl można znaleźć plany dostaw biomasy do dwóch dużych elektrociepłowni zawodowych w Polsce. Wynika z nich, że dopuszczalne wahania dzienne wielkości dostaw są rzędu 10%, a średnia masa dostawy jednym samochodem w okresie zapotrzebowania szczytowego (w zimie) przekracza 20 t. Oznacza to, że energetyka przenosi na rynek dostawców obowiązek koncentracji zasobów pozyskiwanych w miejscach często niedostępnych dla transportu ciężkiego, a także magazynowania dużych ilości biomasy. Przy rosnącym zapotrzebowaniu na biomasę, szczególnie poza leśną, wymagania takie może spełnić rynek dostawców zorganizowany dwupoziomowo:

- poziom pierwszy to producenci biomasy, w polskich warunkach często silnie rozproszeni,
- poziom drugi to przedsiębiorstwa pośredniczące, zajmujące się koncentracją i magazynowaniem zasobów w miejscach dostępnych dla ciężkiego transportu i współpracujące bezpośrednio z energetyką zawodową.

Punkty koncentracji (w tej pracy będą one nazywane hurtowniami) mogą pozyskiwać biomasę transportem lekkim lub specjalistycznym od rozproszonych producentów. Dostawy z hurtowni do elektrowni powinny być realizowane transportem ciężkim, ze względu na odległość oraz logistykę rozładunku, a zatem hurtownie powinny być zlokalizowane w miejscach umożliwiających dostępność takiego transportu (Duda-Kękuś, 2011).

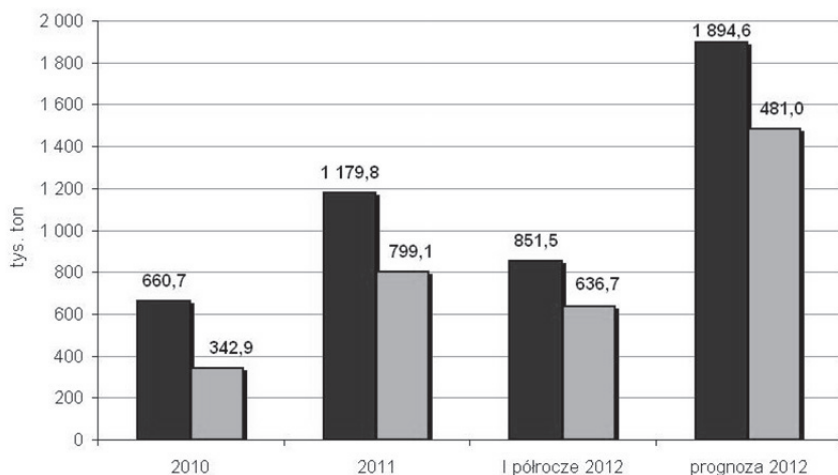
W celu minimalizacji kosztów transportu w ofercie zaleca się organizację pośrednich składowisk biomasy, które powinny zbierać biomasę od lokalnych producentów w promieniu około 3 km. Szacuje się, że obszar pozyskiwania biomasy przez przedsiębiorstwo energetyczne ma promień około 100 km, co oznacza potrzebę utworzenia około 100-150 składowisk, o lokalizacji wyznaczonej na podstawie analizy skupień jej produkcji.

W zakresie wsparcia zarządzania logistycznego operacyjnego, oferuje się system informatyczny integrujący bazę danych o zasobach (wielkość i lokalizacja zasobów) z systemem pozycjonowania GPS oraz mapą sieci dróg i bazą danych o ich stanie. System ma być instalowany na serwerze w zakładzie energetycznym oraz na urządzeniach typu PDA, wykorzystywanych przez operatorów biomasy i kierowców samochodów dostawczych. System ma być zasilany w czasie rzeczywistym bieżącymi danymi o sytuacji zasobowej na składowiskach biomasy (wprowadzanymi przez operatora składowisk) i zakładzie energetycznym. W oparciu o te informacje dyspozytor w zakładzie energetycznym może zarządzać ruchem floty samochodów dostawczych i śledzić na bieżąco pozycję każdego samochodu, dysponując pełną informacją bieżącą o dostępności biomasy i zapotrzebowaniu zakładu. Jedną z funkcji systemu jest optymalizacja tras przewozów. Kierowca samochodu uzyskuje w ten sposób na swoim PDA bieżące zadania przewozowe, ze wskazaniem najkorzystniejszej trasy, uwzględniającej stan dróg i ograniczenia określone dla danego środka transportu (Duda-Kękuś, 2011).

Powyższe rozwiązania dają obraz i możliwości usprawniania procesów logistycznych dostaw biomasy, przez ich koordynację z działaniami producentów oraz zarządzanie w czasie rzeczywistym ruchem floty samochodów dostawczych, z wykorzystaniem nowoczesnych systemów komputerowego wsparcia.

Należy dodać, że usługi o podobnym charakterze realizują już także inne instytucje. W pracy Faber i in. (2010) przedstawiono system oceny zasobów i optymalizacji ich dostaw dla Elektrowni Dolna Odra, oparty na analizach zdjęć satelitarnych i analizie przydatności gleb. System ten był testowany w kilkunastu elektrowniach zawodowych działających na terenie Polski. Z drugiej strony praktycznie wszystkie większe przedsiębiorstwa spedycyjne mają własne systemy komputerowego wsparcia logistyki transportu, oparte na wykorzystaniu GPS i GIS. Pozwalają one optymalizować trasy przewozów, z uwzględnieniem możliwości pozyskiwania ładunków powrotnych, co umożliwia znaczącą obniżkę kosztów. Elektrownie zawodowe lub przedsiębiorstwa pośredniczące w dostawach biomasy mogą zatem korzystać nie tylko z własnej floty, ale z często tańszych usług zewnętrznych spedytorów.

Elektrownie, korzystając z koniunktury, budują bloki energetyczne do spalania biomasy, jednak ciągle rosnący popyt powoduje duże problemy z dostawami biomasy. Najszybciej i najtaniej byłoby przewozić biomasę koleją, ale sieć kolejowa omija elektrownie. Jak podaje Urząd Transportu Kolejowego (2014), w pierwszym półroczu 2012 roku przewoźnicy kolejowi przetransportowali 851,5 tysiąca ton biomasy, co stanowiło około 72% całkowitego wolumenu tego rodzaju przewozów z 2011 roku. Rynek mierzony wykonaną pracą przewozową cechuje analogiczna tendencja. Przewoźnicy wykonali 196,6 mln tonokilometrów, co stanowiło około 77% pracy przewozowej z 2011 roku. Udział przewozów biomasy w całkowitym wolumenie transportu kolejowego wyniósł w I półroczu 2012 roku, wg masy – 0,76%, wg pracy przewozowej – 0,83%. W 2011 roku udział ten wynosił analogicznie: dla masy i pracy – 0,47% (rys. 6.4.3.).



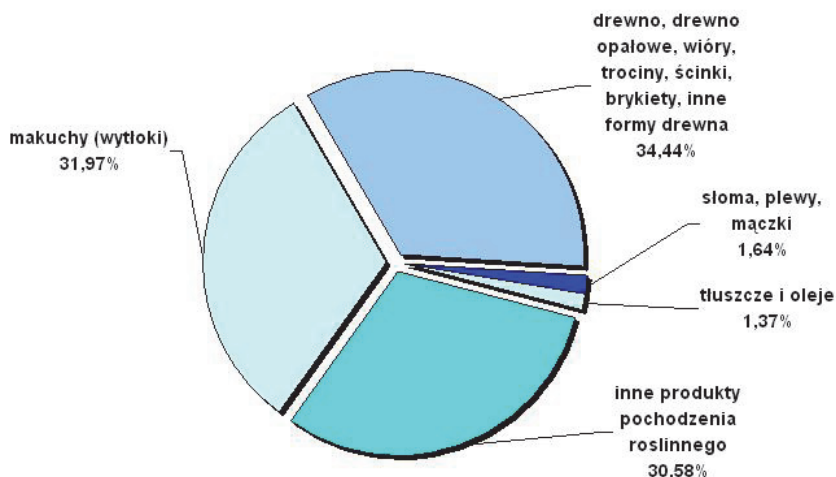
Źródło: www.utk.gov.pl

Rysunek 6.4.3. Przewozy biomasy transportem kolejowym wg masy towarów

W przewozie biomasy dominują przewozy w komunikacji międzynarodowej, które w I półroczu 2012 roku stanowiły 74,8% masy i 60,1% wykonanej przez przewoźników pracy przewozowej. W 2011 roku udział ten wyniósł 67,7% i 64,9%. Łącznie w tej komunikacji przetransportowano w I półroczu 2012 roku 636,7 tysięcy ton biomasy, wykonując pracę na poziomie 118,1 mln tonokilometrów. Przewozy biomasy w Polsce realizowało trzynastu licencjonowanych przewoźników kolejowych, względem siedmiu w 2011 roku. Rok wcześniej taką działalność deklarowało zaledwie trzech przedsiębiorców. W I półroczu 2012 roku dominowały przewozy produktów pochodzenia leśnego, w tym: drewno, trociny, ścinki, wióry, zrębki drzewne, brykiety, które stanowiły 34,4% wolumenu masy, makuchy (wytłoki roślin) – 32% oraz inne produkty pochodzenia roślinnego – 30,6% (rys. 6.4.4.).

Niestety transport kolejowy biomasy nie jest środkiem preferowanym przez zakłady energetyczne. Bardzo często faworyzowane jest wykorzystanie transportu drogowego. Głównie ze względów większej elastyczności i rozłożenia w czasie biomasy przewożonej bezpośrednio od producentów. Sposób ten nie wymusza również potrzeby inwestowania w infrastrukturę ułatwiającą transport koleją (np. budowę czy modernizację ramp i bocznic). Ze względów logistycznych najkorzystniejszą metodą jest dostarczanie biomasy bezpośrednio z pola, transportem producenta. Jednak – jak już wcześniej wspomniano - w tym przypadku transport ten może się odbywać na niewielkie odległości. Wykorzystywanie transportu drogowego w logistyce biomasy jest szczególnie kontrowersyjne ze względu na wyjątkową uciążliwość dla osób zamieszkujących w pobliżu ciągów komunikacyjnych i punktów składowania, gdzie natężenie ruch ciężkiego sprzętu może powodować zwiększone zanieczyszczenie i zapylenie powietrza, hałas i podwyższenie niebezpieczeństwa dla pozostałych użytkowników dróg. Kolejnym problemem jest zwiększona eksploatacja dróg. Większość z nich nie jest przygotowana na obecność wzmożonego ruchu pojazdów o wa-

dze ponad 20 ton. Dotyczy to szczególnie miesięcy letnich, kiedy to drogi ze względów na wyższe temperatury bardziej narażone są na uszkodzenia (Pudełko, 2014).



Źródło: www.utk.gov.pl

Rysunek 6.4.4. Udział towarów stanowiących biomasę wg masy

Organizacja dostaw, odbioru i przetwarzania, czyli wewnętrzne procesy logistyczne, mają podobny charakter i przebieg we wszystkich elektrowniach. Dostawami biomasy dla elektrowni zajmuje się odpowiedni dział, którego zadaniem jest zapewnienie dostaw biomasy loco elektrownia z włączeniem transportu, w dostosowaniu do harmonogramu dostaw ustalonego przez elektrownię. Każda z elektrowni ma po kilkunastu dostawców i z każdym z nich zawierana jest roczna lub wieloletnia umowa na dostawę biomasy. Do obowiązków wykonawcy, określonych w umowie, należą przede wszystkim: zapewnienie dostaw biomasy dostosowanej do wymagań technologicznych jej spalania lub współspalania oraz zapewnienie środków transportu spełniających wymogi określone w umowie. Natomiast wykonawca zobowiązuje się do wykonania przedmiotu umowy zgodnie z jej postanowieniami oraz obowiązującymi przepisami i zasadami bhp. Umowa określa szczegółowo terminy dostaw, wymagania jakościowe oraz zasady postępowania w przypadku niedotrzymania warunków umowy (Duda-Kękuś, 2011).

Dostawca musi pamiętać, że umowa kontraktacyjna jest zawierana dobrowolnie i stanowi umowę cywilno-prawną regulowaną przepisami Kodeksu Cywilnego. Obejmuje ona nie tylko dostawę produktu, ale może zawierać również ustalenia dotyczące procesu produkcji np. doboru uprawianych odmian, formy odstawianej biomasy miejsca jej odbioru (gospodarstwo lub wyznaczony punktu składowania), usługi odbiorcy związane ze zbiorem i transportem biomasy itd. Na mocy umowy dostawca zobowiązany jest dostarczyć określoną ilość produktu, a przedsiębiorstwo kontraktujące świadczyć usługi (jeśli zostały obję-

te umową), produkt odebrać w umówionym terminie oraz zapłacić za niego w terminie ustalonym umową. Spalanie biomasy w elektrowniach i elektrociepłowniach musi być poprzedzone odpowiednimi inwestycjami przystosowującymi zakłady do wykorzystania tego paliwa. Po uruchomieniu takich instalacji konieczne są systematyczne dostawy biomasy w wymaganych ilościach oraz o określonej jakości. W związku z tym zakłady te zainteresowane są wieloletnimi umowami kontraktacyjnym i które zapewnią im potrzebne ilości biomasy. Należy podkreślić, że potrzeby te będą w kolejnych latach wzrastać, gdyż regulacje prawne nakładają na zakłady energetyczne obowiązek systematycznego wzrostu udziału energii pozyskiwanej ze źródeł odnawialnych, w tym przede wszystkim z biomasy. W związku z tym umowy zawarte z zakładami energetycznymi gwarantują dostawcom zbyt biomasy na wiele lat. Warunkiem rozwoju produkcji biomasy na cele energetyczne jest zapewnienie plantatorowi nieco większą opłacalność od uzyskiwanej z uprawy na danym polu tradycyjnych roślin rolniczych. Aby to zapewnić konieczne jest korygowanie cen skupu biomasy, w nawiązaniu do aktualnej ceny roślin rolniczych (referencyjnych), kosztów produkcji, inflacji oraz oprocentowania kredytu, który plantator zaciągnie na założenie plantacji. Cena oferowana plantatorowi w umowie wieloletniej nie może więc być stała ze względu na dużą zmienność wymienionych czynników. Rolnik poszukujący alternatywnego i stabilnego dochodu powinien dążyć do zakładania możliwie dużych plantacji, jednak nie powinny one zajmować więcej niż 25% użytków rolnych gospodarstwa. Bardzo wskazane jest tworzenie grup producenckich, co pozwoli zwiększyć areał upraw energetycznych, zakładać ich plantacje na sąsiednich polach (pola zblokowane), starać się o dodatkowe środki finansowe oraz minimalizować koszty zbioru i transportu. Z uwagi na dużą wilgotność biomasy i małą gęstość w stanie usypowym, plantacje roślin energetycznych powinny być lokalizowane możliwie blisko zakładu energetycznego. Przyjmuje się, że dla małych zakładów energetycznych odległość ta nie powinna przekraczać 20 km, a w przypadku dużych zakładów 50-100 km. Zakład skupujący biomasę powinien zapewnić rolnikowi możliwość odstawiania biomasy jego transportem do składowisk położonych w promieniu do 10 km od gospodarstwa.

Według Fabera i in., (2007; 2009) do najważniejszych elementów umowy kontraktacyjnej są:

- ilość kontraktowanej biomasy ($\pm 20\%$) i sposób obliczenia wartości opałowej;
- sposób ustalania ceny na biomasę, którego szczegółowy opis powinien być aneksem do umowy wieloletniej;
- częstotliwość korekt ceny biomasy w każdym roku i sposób informowania o nich;
- zakres nadzoru nad produkcją biomasy (doradztwo, dobór odmian, instruktaż technologiczny);
- zakres usług świadczonych przez przedsiębiorstwo kontraktujące biomasę związanych ze zbiorem biomasy i jej transportem;
- szczegółowe wymagania dotyczące jakości biomasy, w tym zwłaszcza wilgotności, popielności i udziału zanieczyszczeń;
- cena w dniu odbioru, nie mniejsza jednak od ceny gwarantowanej oraz termin płatności (nie dłuższy 21 dni);
- sposób zgłaszania przez producenta niemożności wywiązania się z umowy i rozstrzygania czy wynikają one z przyczyn losowych niezależnych od plantatora;

- wielkość kary umownej, którą uiści zakład lub plantator jeśli nie wywiąże się z umowy ze swej winy (kara nie większa niż 20-30% wartości niedostarczonego produktu);
- zasady zmiany warunków umowy i formy każdorazowego powiadomienia o zmianach;
- zapis określający kiedy i na jakich warunkach strony mogą odstąpić od umowy;
- zapis dotyczący sposobów rozstrzygania sporów pomiędzy dostawcą biomasy a odbiorcą.

7. WPŁYW ZRÓŻNICOWANIA GENETYCZNEGO ODMIAN RZEPAKU NA WYBRANE WŁASNOŚCI FIZYKO-CHEMICZNE BIOPALIW RME

7.1. Europejskie normy dotyczące spalin

Rozwój motoryzacji spowodował zwiększenie emisji dwutlenku węgla do atmosfery o 28%. Szczególny wzrost przypadł na lata 1980-2007, do czego głównie przyczynił się transport drogowy, który jak się szacuje spowodował ponad 80% ogólnego wzrostu emisji CO₂ pochodzącego z motoryzacji. W obliczu powyższych faktów zastosowanie paliw pochodzenia biologicznego jest coraz bardziej uzasadnione (Biernat, 2005; Biernat i in., 2006; 2007; Kampman i in., 2005). Z wyliczeń stechiometrycznych wynika, że zastąpienie, np. 1 dm³ oleju napędowego biopaliwem rzepakowym RME umożliwia zmniejszenie emisji tego gazu o ok. 3,4 kg (Szlachta i in., 2000). Dodatkowo tego typu biopaliwo charakteryzuje się lepszymi własnościami smarnymi, wyższą liczbą cetanową oraz mniejszą zawartością siarki w stosunku do oleju napędowego uzyskanego z ropy (Cisek i in., 2011; Maniatis, 2007).

W latach 2008-2012 UE planowała zredukować emisję CO₂ o 8% w porównaniu do poziomu z 1990 r., czyli o 346 mln ton. Wszystkim krajom członkowskim narzucono limity, a największe krajom wysokorozwiniętym, np. Niemcom, które zobowiązały się do ograniczenia emisji CO₂ aż o 21% lub Wielkiej Brytanii – o 12,5%.

W roku 1998 doszło do porozumienia Europejskiego Stowarzyszenia Producentów Pojazdów ACEA z poszczególnymi producentami, w wyniku którego ustalono, że do roku 2008 ilość emitowanego przez pojazdy CO₂ zostanie ograniczona do 140 g·km⁻¹. W roku 2007 emisja CO₂ emitowanego z nowych samochodów osobowych oferowanych w sprzedaży na rynku europejskim wynosiła średnio 163 g·km⁻¹ (Brzeżański, 2007). Podobne zobowiązania przyjęły stowarzyszenia producentów pojazdów: japońskie (JAMA) i koreańskie (KAMA), z tą różnicą, że docelowym był tu rok 2009. W ramach powyższych zobowiązań sprecyzowano, że pomiar emisji CO₂ z nowych samochodów osobowych będzie dokonywany zgodnie z dyrektywą Komisji 93/116/WE. Od roku 2010 zaczęło obowiązywać kolejne ograniczenie emisji CO₂ dla nowych pojazdów, które zakłada zmniejszenie ilości wydalanego związku określanego według testu NEDC do 120 g·km⁻¹ (Brzeżański i Śliwiński, 2004). Aby spełnić takie wymagania, należało ograniczyć średnie zużycie paliwa w samochodach osobowych z ok. 5,8 dm³ do 5,0 dm³ na 100 km. W celu spełnienia ww. wymogów producenci pojazdów zostali zmuszeni do zastosowania efektywnej metody, określanej w literaturze terminem „downsizing”. Polega ona na zmniejszeniu objętości skokowej silnika, a odpowiednie wartości momentu obrotowego i mocy osiągane są poprzez doładowanie silnika lub stosowania biopaliw (Brzeżański i Śliwiński, 2004; Rogulska i Gumeniuk, 2006; Zang i in., 2003). W roku 2012 Komisja Europejska przedstawiła plany ograniczenia do 2020 roku emisji CO₂ dla samochodów do 95 g·km⁻¹. Jednocześnie zobowiązując się do ustalenia nowych limitów na 2025 i 2030 rok do końca 2014 roku. Komisja

Europejska przyjęła również założenia do długoterminowej strategii do roku 2050, dotyczącej efektu cieplarnianego. Założono w niej, że aby poziom temperatury na świecie nie wzrósł o więcej niż 2°C, gospodarka UE musi zmniejszyć emisję CO₂, aż o 70% w stosunku do roku bazowego, czyli 1990 r.

W celu precyzyjnego kontrolowania ilości emitowanych toksycznych składników spalin, w ostatnich latach w Europie zaproponowano normy o nazwie EURO (Szlachta, Cisek, Wcisło, 2000). Przedmiotowe wymogi różnią się co do wartości maksymalnych emisji poszczególnych składników spalin, w zależności od rodzaju silników oraz ich zastosowań (Cisek, 1998; Merkisz, 1994). W tabeli 7.1.1 zaprezentowano wymogi dotyczące dopuszczalnych emisji spalin w poszczególnych normach EURO oraz daty rozpoczęcia obowiązywania dla pojazdów z silnikiem benzynowym, natomiast w tabeli 7.1.2, dla silników z zapłonem samoczynnym (ZS). Przedmiotowe normy obowiązują pojazdy nowe, a więc muszą być respektowane w momencie udzielania homologacji.

Tabela 7.1.1. Normy spalin dla pojazdów z silnikiem z zapłonem iskrowym ZI

Dopuszczalne wartości emisji spalin w poszczególnych normach EURO dla pojazdów z silnikiem ZI						
(g·km ⁻¹)	EURO 1	EURO 2	EURO 3	EURO 4	EURO 5	EURO 6
CO	2,72	2,2	2,3	1	1	1
HC	–	–	0,2	0,1	0,1	0,1
NO _x	–	–	0,15	0,08	0,06	0,06
HC + NO _x	0,97	0,5	–	–	–	–
PM	–	–	–	–	0,005	0,005

Źródło: Wcisło, 2013

Tabela 7.1.2. Normy spalin dla pojazdów z silnikiem wysokoprężnym (Diesel) ZS

Dopuszczalne wartości emisji spalin w poszczególnych normach EURO dla pojazdów z silnikiem ZS						
(g·km ⁻¹)	EURO 1	EURO 2	EURO 3	EURO 4	EURO 5	EURO 6
CO	3,16	1	0,64	0,5	0,5	0,5
HC	-	0,15	0,06	0,05	0,05	0,09
NO _x	-	0,55	0,5	0,25	0,18	0,08
HC + NO _x	1,13	0,7	0,56	0,3	0,23	0,17
PM	0,14	0,08	0,05	0,009	0,005	0,005

Źródło: Wcisło, 2013

W tabeli 7.1.3 zestawiono daty rozpoczęcia obowiązywania norm EURO dotyczące limitów dopuszczalnej emisji poszczególnych składników spalin.

W 2008 roku Parlament Europejski uchwalił normę Euro 6, która dotyczy poziomu zanieczyszczeń emitowanych przez ciężkie pojazdy samochodowe. Dopuszczalna wartość emisji tlenków azotu ma wynieść 400 mg·kWh⁻¹, a więc o 80% mniej niż w normie Euro 5. Limity emisji cząstek stałych zostaną zmniejszone o 66% i mają wynosić 10 mg·kWh⁻¹.

Tabela 7.1.3. Normy EURO oraz dyrektywy, które je sankcjonowały

Numer normy	Data rozpoczęcia obowiązywania	Numer dyrektywy
EURO 1	1993	Dyrektywa 91/441/EC dla samochodów osobowych oraz dla osobowych i lekkich ciężarówek – 93/59/EEC
EURO 2	1996	Dyrektywa 94/12/EC oraz Dyrektywa 94/12/EC, dla samochodów osobowych
EURO 3	2000	Dyrektywa 98/69/EC, dla wszystkich pojazdów
EURO 4	2005	Dyrektywa 98/69/EC (& 2002/80/EC), dla wszystkich pojazdów
EURO 5	2011	Dyrektywa 2007/715/EC, dla lekkich samochodów osobowych i służbowych
EURO 6	2014	Od 2014 roku: Dyrektywa 2007/715/EC, dla ciężkich pojazdów samochodowych

Źródło: *Wcisło, 2013*

7.2. Możliwości produkcji biopaliw ciekłych w Polsce

Zgodnie z obowiązującą w Polsce Ustawą o biokomponentach i biopaliwach ciekłych, która została przyjęta przez Sejm RP w dniu 25 sierpnia 2006 r. (Dz. U. 06.169.1199 z 25. września 2006 r.) biopaliwa można produkować od 1 stycznia 2006 roku. Ustawa określa dopuszczalne do produkcji biopaliwa: bioetanol, biodiesel, biogaz, biometanol, biodimetyloeter, bio-ETBE, bio-MTBE, biopaliwa syntetyczne, biowodór oraz czysty olej roślinny. Biopaliwa mogą być produkowane i/lub wprowadzane do obrotu przez duże koncerny oraz wybrane floty. Głównym biopaliwem produkowanym na dużą skalę jest Biodiesel oznaczony ogólnie jako FAME (ang. Fatty Acid Methyl Esters) – estry metylowe kwasów tłuszczowych zarówno olejów roślinnych, jak i tłuszczów zwierzęcych (Jęczmionek, 2012; Mikkonen, 2011; 2012).

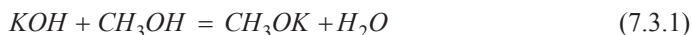
Polska zobowiązała się w tzw. Narodowym Celu Wskaźnikowym (NCW), że począwszy od roku 2008 będzie zwiększać udział biopaliw w całkowitej konsumpcji paliw. Do roku 2013 obowiązują następujące wielkości NCW: 2008 r. – 3,45%, 2009 r. – 4,60%, 2010 r. – 5,75%, 2011 r. – 6,20%, 2012 r. – 6,65%, 2013 r. – 7,10%. Zgodnie z rządowymi celami na lata 2013-2018, określającymi minimalny udział biokomponentów i innych paliw odnawialnych w ogólnej ilości paliw zużywanych w ciągu roku kalendarzowego, w transporcie zużycie powinno wynosić: w latach 2013-2016 – 7,10 %, w 2017 r. – 7,8 %, a w 2018 r. – 8,5 %.

Do grupy osób szczególnie uprzywilejowanych w zakresie produkcji biopaliw na własne potrzeby należą rolnicy lub tzw. floty pojazdów. Pierwsi z nich mogą wytwarzać biopaliwa na użytek własny, po uzyskaniu wpisu do rejestru rolników wytwarzających biopaliwa ciekłe na własny użytek, prowadzonego przez Agencję Rynku Rolnego. W myśl prawa rolnikiem jest osoba fizyczna, osoba prawna oraz jednostka organizacyjna nie posiadająca osobowości prawnej, prowadząca działalność rolniczą w gospodarstwie rolnym, w rozumieniu ustawy z dnia 15 listopada 1984r. o podatku rolnym (Dz. U. z 2006 r. Nr 136, poz. 969). Biopaliwa może również produkować grupa osób fizycznych lub grupa producentów rolnych, prowadząca w gospodarstwach rolnych działalność rolniczą. O wpis do rejestru

mogą ubiegać się rolnicy dysponujący odpowiednimi urządzeniami technicznymi i obiektami budowlanymi, spełniającymi określone wymagania, w szczególności te wymienione w przepisach o ochronie przeciwpożarowej, przepisach sanitarnych i o ochronie środowiska, które umożliwiają prawidłowe wytwarzanie biopaliw ciekłych oraz posiadający zezwolenie na prowadzenie składu podatkowego.

7.3. Charakterystyka procesu produkcji biopaliw typu RME

W rozdziale opisano proces produkcji w reaktorze konstrukcji Grzegorza Wcisły o symbolu GW-100 lub GW-200. Urządzenia należą do Małopolskiego Centrum Odnawialnych Źródeł Energii „BioEnergia”. Do transestryfikacji (metanolizy) oleju rzepakowego zastosowano alkohol metylowy. Jako katalizator ww. reakcji użyto alkaliczny wodorotlenek potasu, KOH. Transestryfikację prowadzono dwustopniowo, każdorazowo w temperaturze 330-340 K. Proces prowadzono następująco: najpierw przygotowano mieszaninę alkoholu metylowego z katalizatorem. Następnie, do ogrzanego do temperatury 330 K oleju rzepakowego dodawano mieszaninę alkoholu i katalizatora. Proces prowadzono w reaktorze przez 50 minut. Mieszaninę katalityczną sporządzono przez zmieszanie metanolu i wodorotlenku potasu. W wyniku wstępnej reakcji metanolu i katalizatora otrzymuje się kompleks przejściowy alkoholan (metanolan) potasu, CH_3OK , który został zapisany w postaci równania 1.



Na rysunku 7.3.1. przedstawiono reaktor GW-100 (200), w którym wytwarzano wszystkie RME używane podczas badań.



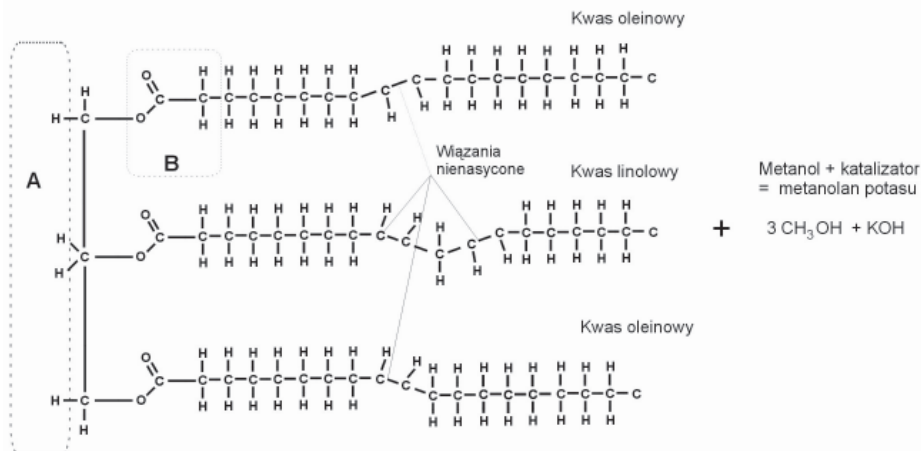
Źródło: Wcisła, 2013

Rysunek 7.3.1. Reaktor GW 100 (200) do produkcji biopaliw typu Biodiesel FAME (RME)

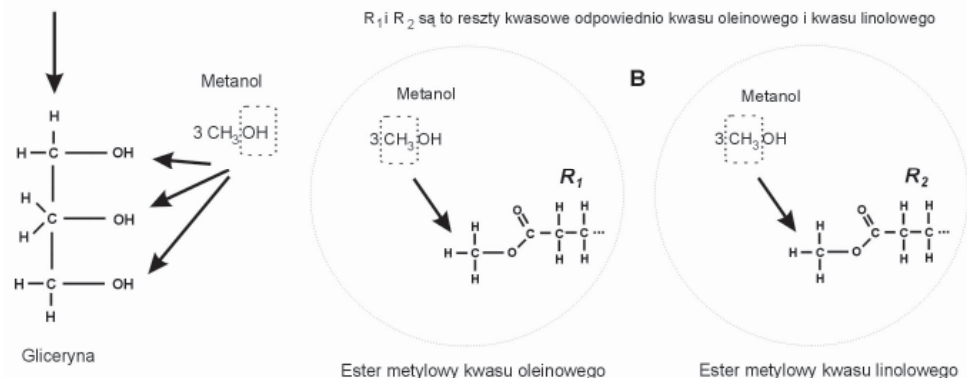
Na rys. 7.3.2. przedstawiono model transestryfikacji typowej dla oleju rzepakowego.

Model otrzymywania RME (FAME) z typowego trójglicerydu dla oleju rzepakowego składającego się z dwóch kwasów oleinowych i jednego linolowego

Rozbijamy dużą cząstkę trójglicerydu na trzy małe, z których w procesie transestryfikacji działając metanolem uzyskujemy dwie cząstki estrów kwasu oleinowego i jedną kwasu linolowego. Z zaznaczonej symbolem "A" pozostałości plus trzy grupy OH otrzymane z rozłożenia cząstki metanolu powstanie glicerol.



W wyniku transestryfikacji trójglicerydu otrzymujemy trzy cząstki estrów metylowych wyższych kwasów tłuszczowych (FAME) oraz jedną glicerynę



Źródło: Wcisło, 2013

Rysunek 7.3.2. Model transestryfikacji typowej dla oleju rzepakowego cząstki trójglicerydu

7.4. Podstawy teoretyczne obliczeń procesu transestryfikacji olejów roślinnych i/lub tłuszczów do FAME

Wychodząc z zależności 7.4.1.

$$r \cdot V_r = r'_p \cdot m \quad (7.4.1)$$

gdzie:

- r – szybkość reakcji odniesiona do jednostki objętości reaktora
($\text{kmol} \cdot \text{m}_{\text{reaktora}}^{-3} \cdot \text{s}$),
- r'_p – szybkość reakcji odniesiona do jednostki objętości płynu reagującego
($\text{kmol} \cdot \text{m}_{\text{reaktora}}^{-3} \cdot \text{s}$),
- V_r – objętość reaktora (m^3),
- m – masa reagenta (reagentów)(kg).

szybkość reakcji transestryfikacji w odniesieniu do jednostki objętości reaktora r_T można zapisać w postaci wyrażenia 7.4.2, natomiast dla oleju rzepakowego i metanolanu wyrażeniami 7.4.3 i 7.4.4.

$$r_T = r_A \cdot V_r \cdot V^{-1} [\text{kom} \cdot \text{m}_{\text{substratu}}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (7.4.2)$$

gdzie:

- V_r – objętość reaktora (m^3),
- V – objętość substratów (m^3),
- r_A – szybkość reakcji składników.

$$r_{O_{rz}} V_r = r'_{r_{O_{rz}}} V \quad (7.4.3)$$

$$r_{mp} V_r = r'_{mp} V \quad (7.4.4)$$

gdzie:

- V – objętość mieszaniny reagującej (m^3),
- V_r – objętość reaktora (m^3),
- r' – szybkość reakcji (oleju rzepakowego r_{O_2} z metanolanem r_{mp}) odniesiona do objętości mieszaniny reakcyjnej ($\text{kmol}/(\text{m}^3_{\text{mieszaniny}} \cdot \text{s})$).

Przy określonym ciśnieniu i temperaturze szybkość zużywania substratów lub wytwarzania RME w układzie zamkniętym związana jest z szybkością reakcji transestryfikacji, którą można zapisać w postaci zależności 7.4.5.

$$v_i r = V^{-1} \cdot dn_i \cdot dt^{-1} \quad (7.4.5)$$

po zsumowaniu po wszystkich reagentach otrzymuje się zależność 7.4.6:

$$\sum_{i=1}^N V^{-1} \cdot dn_i \cdot dt^{-1} = \sum_{i=1}^N v_i r \quad (7.4.6)$$

uwzględniając zależność 7.4.7:

$$\sum_{i=1}^N v_i r = r \sum_{i=1}^N v_i = \Delta v \cdot r \quad (7.4.7)$$

oraz uwzględniając 7.4.8:

$$\sum_{i=1}^N V^{-1} \cdot dn_i \cdot dt^{-1} = V^{-1} \cdot dn_i \cdot dt \quad (7.4.8)$$

ponieważ zależność 7.4.9:

$$V^{-1} \cdot dn \cdot dt^{-1} = \Delta v \cdot r \quad (7.4.9)$$

Dlatego sumaryczną ilość moli mieszaniny można wyliczyć z zależności 7.4.10:

$$dn \cdot dt^{-1} = d(V \cdot C) \cdot dt^{-1} = C \cdot dV \cdot dt^{-1} + V \cdot dC \cdot dt^{-1} \quad (7.4.10)$$

Jeżeli założy się stałe wartości ciśnienia i temperatury początku reakcji ($p = \text{const}$, $T = \text{const}$), to można zapisać 7.4.11:

$$C = p \cdot (RT)^{-1} = \text{const}, \text{ czyli } dC \cdot dt^{-1} = 0 \quad (7.4.11)$$

a uwzględniając 7.4.12:

$$V^{-1} \cdot C \cdot dV \cdot dt^{-1} + V^{-1} \cdot dC \cdot dt^{-1} = \Delta v \cdot r \quad (7.4.12)$$

otrzymuje się zależność 7.4.13 na zmianę objętości mieszaniny (olej rzepakowy i metanolanu), która związana jest z szybkością reakcji transestryfikacji r_T

$$V^{-1} \cdot dV \cdot dt^{-1} = \Delta v \cdot C^{-1} \cdot r_T \quad (7.4.13)$$

Zmianę koncentracji zarówno substratów, tj. oleju rzepakowego oraz metanolanu jak i produktów, czyli RME oraz gliceryny w mieszaninie reakcyjnej obliczono w następujący sposób: wychodząc z równania 7.4.14:

$$V^{-1} \cdot dn_i \cdot dt^{-1} = v_i \cdot r_T \quad (7.4.14)$$

po przekształceniach i podstawieniach otrzymuje się zależność 7.4.15, która opisuje zmianę koncentracji danego składnika procesu transestryfikacji:

$$dC_i \cdot dt^{-1} = (v_i - C_i \cdot (C \Delta)^{-1} \cdot \Delta v) r_T \quad (7.4.15)$$

7.5. Określenie ciepła spalania i wartości opałowej biopaliw typu Biodiesel RME

Jednym z najważniejszych parametrów decydujących o przydatności oleju rzepakowego lub biopaliwa RME do spalania jest ciepło spalania i wartość opałowa. Wartość opałowa konwencjonalnego oleju napędowego spełniającego wymogi normy PN EN 590 zawiera się w przedziale od 42 do 44 MJ·kg⁻¹. Teoretyczną wartość opałową (W_p) paliwa lub biopaliwa składającego się elementarnie z atomów: węgla C, wodoru H₂, siarki S i tlenu O, można obliczyć z następującej zależności 7.5.1 (Dowkonnt, 1973):

$$W_p = 3,39 \cdot c_p + 12,41 \left(h_p \cdot \frac{O_p}{8} \right) + 1,05 S_p - 0,25 (9 \cdot h_p + w'_p) \frac{kJ}{kg} \quad (7.5.1)$$

gdzie:

c_p, h_p, S_p, O_p i w'_p – oznaczają skład i udział poszczególnych składników w paliwie.

Jednak dokładną wartość uzyskuje się po wykonaniu oznaczenia ciepła spalania, a następnie wylicza się wartość opałową.

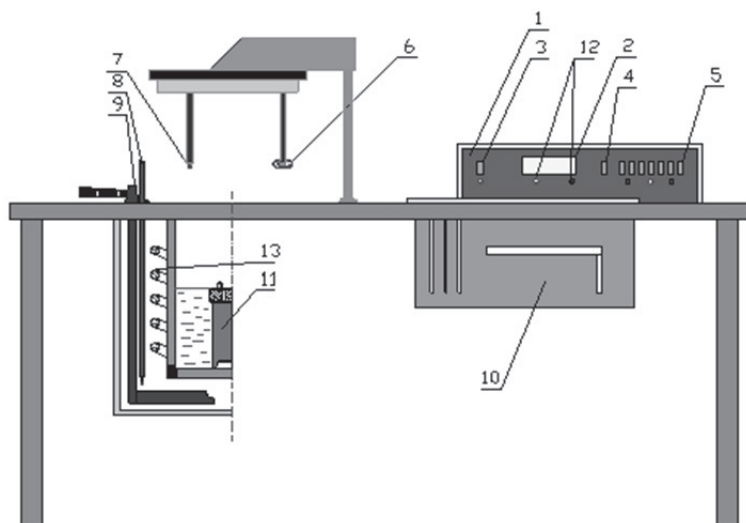
Celem badań było oznaczenie ciepła spalania (wartości opałowej górnej) i wartości opałowej (wartości opałowej dolnej) czterdziestu odmian rzepaku. Do badań wytypowano zarówno odmiany ozime, jak i jare oraz populacyjne i mieszańce złożone F1. Przy uwzględnieniu plonowania można wyznaczyć całkowitą ilość biopaliwa jaką można uzyskać w przeliczeniu na jednostkę uprawy, np. 1ha. Wszystkie odmiany rzepaku użyte w badaniach zostały pozyskane w ramach współpracy z firmy OBROL. Badaniom poddano biopaliwa RME uzyskane z oleju następujących odmian rzepaku: Adam F1, Aviso, Bakarat, Bazyl, Bellevue, Bosman, Bojan, Kabriolet, Adeli, Californium, Casoar, Castille, Kontakt, Dogger, Elektra F1, Extend F1, Heros F1, Huzar Pamela, Exquisite F1, DK Exquisite F1, Canti, Artoga F1, Arot, Winter, Visio, Vectra F1, Toccata F1, Tassilo F1, Sherlock, Remy, Pomorzanin F1, Ontario, Mozart, Monolit, Lirajet, Lubomir, Kaszub F1 oraz dwie odmiany rzepaku, które obecnie są w rejestracji P1 i P2.

Metodyka badań

Ciepło spalania oraz wartość opałową wyznaczono zgodnie z obowiązującą w tym zakresie w Polsce normą PN-86/C-04062. Zgodnie z nią oznaczenia dokonuje się poprzez spalenie próbki paliwa w bombie kalorymetrycznej, która jest zanurzona w naczyniu kalorymetrycznym, wypełnionym ściśle określoną objętością wody (2,7 dm³). Zapłon paliwa następuje od drutu oporowego. Na skutek wydzielania się ze spalanej próbki ciepła podnosi się temperatura wody, a jej przyrost jest głównym parametrem, na podstawie którego wyznacza się ciepło spalania.

Badania dotyczące określenia wpływu genetycznego zróżnicowania odmian rzepaku na ciepło spalania oraz wartość opałową wykonano we współpracy z Małopolskim Centrum Odnawialnych Źródeł Energii „BioEnergia” na kalorymetrze KL-10 firmy Precyzja Bit.

Schemat ideowy kalorymetru przedstawiono na rysunku 7.5.1. Zgodnie z normą PN-86/C-04062 masa spalanego paliwa, odmierzona z dokładnością do 0,002 g, winna zawierać się w przedziale od 0,6 do 0,8 g. Paliwo spalano w bombie kalorymetrycznej, przy ciśnieniu czystego tlenu (> 99% O₂) równym 3 MPa. Do zapłonu próbki paliwa zastosowano drucik oporowy z kantal, którego ciepło spalania wynosi 6 704 J·g⁻¹.



- | | | |
|-------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| 1. urządzenie sterujące | 5. odczyt ciepła spalania | 10. układ komputerowy |
| 2. wyświetlacz cyfrowy | 6. mieszadło | 11. bomba kalorymetryczna |
| 3. przełącznik prądu | 7. termometr | 12. diody sygnalizacyjne |
| 4. start pomiaru | 8. termometr płaszczu wodnego | 13. węzownica |
| | 9. mieszadło płaszczu wodnego | |

Źródło: Wcisło, 2005

Rysunek 7.5.1. Schemat ideowy kalorymetru KL10

Oznaczenie ciepła spalania – obliczenia

Całkowity efekt cieplny spalanych próbek oleju rzepakowego wyznaczono na podstawie zależności 7.5.2:

$$Q_b = \frac{C_k \cdot \Delta t - Q_2 m_2}{m_o} \quad (7.5.2)$$

gdzie:

- C_k – pojemność cieplna kalorymetru – 12,908 (kJ·°C⁻¹),
 Δt – skorygowany wzrost temperatury podczas spalania,

- Q_2 – ciepło spalania drutu zapłonowego (kantalu) – 6 704 (kJ·kg⁻¹),
 m_o – masa próbki badanego paliwa (kg),
 m_2 – masa drutu zapłonowego – 0,000007 (kg).

Formuła zapisana w postaci wyrażenia 7.5.3 wskazuje sposób określenia skorygowanego wzrostu temperatury podczas spalania:

$$\Delta t = [(t_n + h_n) - (t_o + h_o)] + a + b \quad (7.5.3)$$

gdzie:

- t_o – początkowa temperatura okresu głównego (spalania próbki) (°C),
 t_n – końcowa temperatura okresu głównego (spalania próbki) (°C),
 h_o i h_n – poprawki na kalibrację termometru przy temperaturze t_o i t_n ,
 a – poprawka na wymianę ciepła kalorymetru (°C),
 b – poprawka na wystający słupek rtęci (°C).

Ciepło spalania próbek oleju rzepakowego wyznaczono na podstawie równania 7.5.4:

$$Q_s^a = \frac{C_k \Delta t - Q_2 m_2}{m_o} + \Delta Q_s \quad (7.5.4)$$

gdzie:

ΔQ_s – poprawka na przeliczanie ciepła spalania paliwa (wg PN-86/C-04062 dla oleju napędowego wynosi 59 (kJ·kg⁻¹), natomiast dla oleju opałowego 50 (kJ·kg⁻¹). W obliczeniach dla oleju rzepakowego przyjęto wartość $\Delta Q_s = 50$ (kJ·kg⁻¹).

Wartość opałową paliwa rzepakowego wyliczono na podstawie równania 7.5.5:

$$Q_i^a = Q_s^a - 24,42(8,94 \cdot H - W) \quad (7.5.5)$$

gdzie:

- H – zawartość wodoru w badanym paliwie % (m/m),
 W – zawartość wody w badanym paliwie % (m/m).

Ciepło spalania dla badanych czterdziestu odmian rzepaku mieściło się w przedziale od 37,4 do 39,8 (MJ·kg⁻¹). Najwyższą wartością charakteryzował się olej odmiany Contact. Różnica w wartości ciepła spalania pomiędzy najkorzystniejszą a najmniej korzystną odmianą wynosiła 6,4% (m/m). Z kolei najniższą wartością ciepła spalania odznaczał się olej odmiany Huzar – 37,4 MJ·kg⁻¹. Wartościami zbliżonymi do ciepła spalania najlepszej odmiany charakteryzował się olej następujących odmian: DK Exquisite F1, Winter, Elektra oraz odmiany w trakcie rejestracji P2.

Wartość opałowa badanych odmian rzepaku mieściła się w przedziale od 34,7 do 37,61 MJ·kg⁻¹. Wartość opałowa najkorzystniejszej odmiany rzepaku (Contact) jest o ponad 8% (m/m) wyższa niż odmiany najmniej korzystnej (Huzar). Stosunkowo wysokimi wartościami opałowymi charakteryzowały się również odmiany: Pomorzanin i Bojan. Niskie

wartości ciepła spalania oraz wartości opałowej uzyskano dla odmian rzepaku Herkules F1 – 37,6 (35,2) oraz Vision – 38,1 (35,9) MJ·kg⁻¹.

W zależności od odmiany rzepaku, z której został wykonany olej, wartość opałowa danego biopaliwa typu Biodiesel B100 RME zmieniała się od wartości 36,1 do 39,1 MJ·kg⁻¹. Najwyższą wartością opałową charakteryzował się Biodiesel RME uzyskany z oleju odmiany Contact, natomiast najniższą charakteryzował się RME uzyskany z oleju odmiany Huzar. Rozpiętość w wartości opałowej pomiędzy RME dla badanych odmian wynosiła około 8% (m/m). Z kolei najniższą wartością opałową odznaczał się RME uzyskany z oleju odmiany Huzar, 36,1 MJ·kg⁻¹. Zbliżonymi do najbardziej energetycznego biopaliwa RME wartościami opałowymi charakteryzował się Biodiesel B100 uzyskany z oleju następujących odmian rzepaku: Bazyl, Adeli, Caspar, Extend F1, Herkules F1, Kaszub F1, Remy, Sherlock, Winter, P1, P2, DK Exquisite F1. Wartości opałowe RME uzyskane z ww. odmian mieściły się w zakresie od 38 do 39 MJ·kg⁻¹.

7.6. Ocena biopaliw RME ze względu na układ estrów kwasów tłuszczowych

Biopaliwa FAME składają się przede wszystkim z estrów kwasów tłuszczowych, spośród których zdecydowaną przewagę stanowi kwas oleinowy oraz kwasy linolowy i linolenowy. Udział ww. kwasów wpływa na własności fizykochemiczne biopaliw FAME.

Badaniom poddano biopaliwa RME wyprodukowane z odmian rzepaku w reaktorze GW-100 należącym do MCOŹE „BioEnergia”. Do badań wytypowano dwa RME uzyskane odpowiednio z odmiany ulepszonej i populacyjnej. Dla porównania wykonano również badania handlowego biopaliwa B100 zakupionego na stacji sieci Bliska należącej do koncernu PKN Orlen S.A. Oznaczenie estrów kwasów tłuszczowych w przedmiotowych biopaliwach przeprowadza się za pomocą chromatografu gazowego, zgodnie z normą PN-EN 14103 oraz PN-EN ISO 5508. Uzyskane chromatogramy pozwoliły na określenie ilości udziałów poszczególnych kwasów tłuszczowych, począwszy od kwasu mirystynowego zawierającego czternaście atomów węgla w łańcuchu C14, aż do kwasu nerwonowego bazującego na dwudziestu czterech atomach węgla C24:1. Badania przeprowadzono przy użyciu wielokanałowego chromatografu gazowego firmy Thermo, typ TRACE GC Ultra. Na rysunku 7.6.1 przedstawiono stanowisko badawcze do chromatografii gazowej.

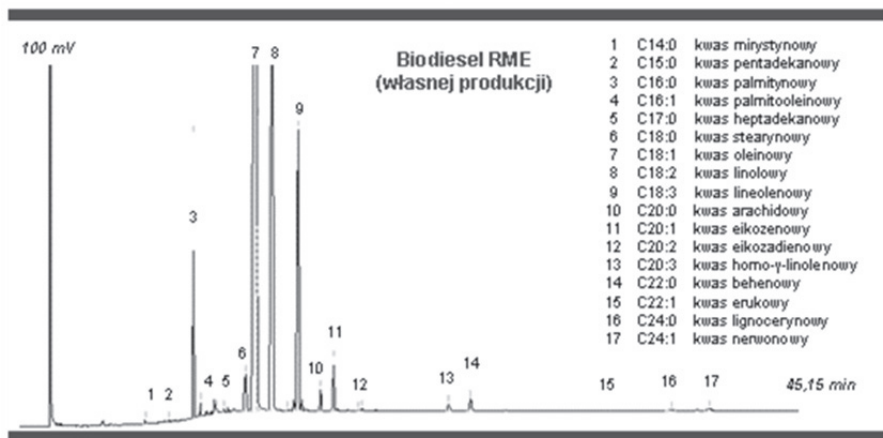
Szczegółową oceną wyników badań analitycznych objęto trzy podstawowe kwasy tłuszczowe, decydujące o własnościach fizyko-chemicznych biopaliw: oleinowy, linolowy oraz linonenowy.



Źródło: Wcisło, 2013

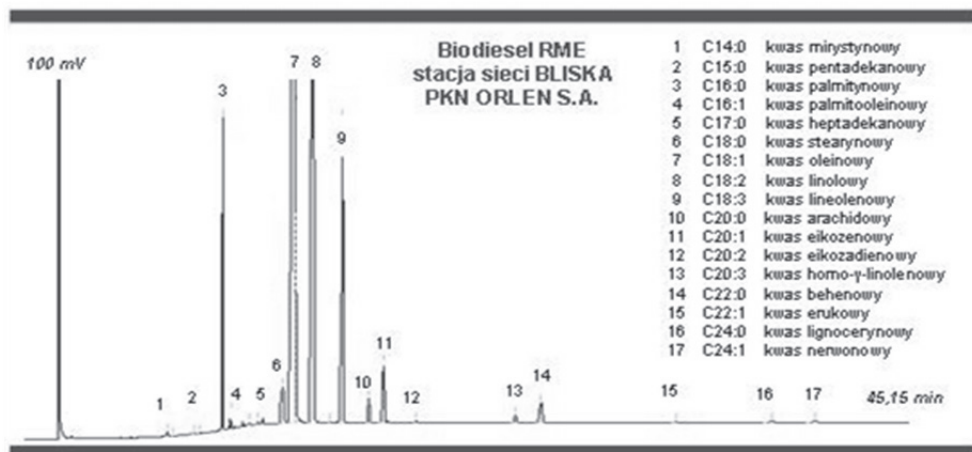
Rysunek 7.6.1. Stanowisko badawcze wyposażone w wielkanałowy chromatograf gazowy firmy Thermo typ TRACE GC Ultra

Na rysunku 7.6.2 i 7.6.3 zaprezentowano przykładowe chromatogramy uzyskane dla dwóch Biodiesli B100 RME. Chromatografy wyglądają identycznie, dlatego z wykresu jest trudno wnioskować o zawartości poszczególnych kwasów tłuszczowych. Z tego powodu nie zaprezentowano również chromatografów dla pozostałych biopaliw RME. Pośród wykorzystanych podczas badań odmian rzepaku znajdują się te o podwyższonej ilości kwasu oleinowego oraz tzw. „zwykłe” populacyjne, dlatego w tabeli 7.6.1 zestawiono dane dla dwóch skrajnych odmian, dotyczące zawartej w nich ilości poszczególnych kwasów tłuszczowych.



Źródło: Wcisło, 2013

Rysunek 7.6.2. Przykładowe chromatogramy Biodiesla RME własnej produkcji



Źródło: Wcisło, 2013

Rysunek 7.6.3. Chromatogram Biodiesla RME ze stacji paliw Bliska

Tabela 7.6.1. Porównanie ilości kwasów tłuszczowych w Biodieslach RME

Nazwa i udział kwasu tłuszczowego % (m/m)	Wzór chemiczny	RME B100 z oleju rzepakowego odmiany ulepszonej	RME z oleju rzepa- kowego z odmiany tradycyjnej	RME B100 ze stacji Bliska
Kwas mirystynowy	C14:0	0,064	0,052	0,052
Kwas pentadekanowy	C15:0	0,038	0,023	0,023
Kwas palmitynowy	C16:0	3,701	4,486	4,486
Kwas palmitoleinowy	C16:1	0,251	0,265	0,265
Kwas heptadekanowy	C17:0	0,201	0,112	0,112
Kwas stearynowy	C18:0	1,792	1,808	1,808
Kwas oleinowy /*	C18:1	72,421	60,912	60,912
Kwas linolowy /*	C18:2	11,623	19,252	19,252
Kwas lineolenowy /*	C18:3	8,322	8,984	8,984
Kwas arachidowy	C20:0	0,611	0,646	0,646
Kwas eikozenowy	C20:1	1,482	1,721	1,721
Kwas eikozadienowy	C20:2	0,000	0,000	0,000
Kwas homo-γ-linolenowy	C20:3	0,000	0,000	0,000
Kwas behenowy	C22:0	0,341	0,365	0,365
Kwas erukowy	C22:1	0,522	0,909	0,909
Kwas lignocerynowy	C24:0	0,177	0,129	0,129
Kwas nerwonowy	C24:1	0,122	0,187	0,187
Stopień identyfikacji estrów metylo- wych kwasów tłuszczowych		Σ =99,74% (m/m)	Σ = 99,85% (m/m)	Σ = 98,12% (m/m)

/* estry kwasów tłuszczowych, które stanowią ok. 90% (9 m/m) wszystkich estrów

Źródło: Wcisło, 2013

Ze względu na sumaryczną ilość estrów kwasów tłuszczowych w RME, wszystkie biopaliwa spełniają wymagania normy EN 14214. Biodiesel własnej produkcji uzyskany z ulepszonej odmiany charakteryzował się innym składem kwasów tłuszczowych od RME uzyskanego z popularnych obecnie odmian. Należy podkreślić, że odmiana ulepszona zawierała, aż o ponad 11% (m/m) więcej korzystnego kwasu oleinowego i ok. 8% (m/m) mniej niekorzystnego kwasu linolowego.

Porównanie biopaliw RME własnej produkcji oraz pochodzących ze stacji Bliska pokazało, że używając małych reaktorów, można uzyskać biopaliwa o zbliżonej jakości do FAME handlowego. Można więc wnioskować, że gdyby rolnicy lub przedsiębiorcy dysponujący flotą pojazdów posiadali reaktory wysokiej klasy, to mogliby wytwarzać na własne potrzeby biopaliwa, których najistotniejsze parametry fizykochemiczne nie odbiegałyby od odpowiednich handlowego FAME.

7.7. Określenie składu frakcyjnego biopaliw RME i oleju napędowego

Jednym z ważniejszych parametrów służących do oceny paliw pod kątem własności eksploatacyjnych jest ich skład frakcyjny, który określa własności destylacyjne paliw. Podczas wyznaczania krzywej destylacji określa się początek destylacji, a następnie ilość odparowanego paliwa w funkcji temperatury, aż do osiągnięcia końca destylacji. Skład frakcyjny określa zatem zdolność paliwa do przechodzenia w stan pary i jest jednym z czynników wpływających na lotność paliwa. Określenie charakterystycznych punktów destylacji pozwala przewidzieć zachowanie się paliwa w czasie eksploatacji, m.in. łatwość rozruchu silnika oraz ekonomikę zużycia paliwa (Szlachta i in., 2000). Własności rozruchowe paliwa zależą od temperatury początku destylacji oraz od ilości paliwa odparowanego w początkowym okresie destylacji – im większa zawartość lekkich frakcji tym lepsze własności rozruchowe (Lotko i Longwic, 1999). Z drugiej strony nie może być ich za dużo, ze względu na to że zbyt wielka ilość lżejszych frakcji powodowałaby zbyt gwałtowne spalanie, a więc duże przyrosty ciśnienia w funkcji obrotu wału korbowego $dp/d\alpha$.

Zgodnie z wymogami normy PN-EN 590:2011 dotyczącej oleju napędowego, do temperatury 250°C powinno odparować nie więcej niż 65% (v/v) paliwa. Stosunek procentowy odparowanego paliwa do ww. temperatury umożliwia ocenę średniej odparowalności paliwa, która wpływa na regularność pracy silnika. Z kolei temperatura końca destylacji wskazuje na ilość ciężkich, trudno odparowujących frakcji, wpływających ujemnie na pracę silnika. Wraz ze wzrostem temperatury końca destylacji oraz zwiększeniem ilości ciężkich frakcji, może następować wzrost zużycia paliwa. Temperatura oddestylowania 90% (v/v) paliwa oraz końca jego destylacji pozwala na ocenę paliwa pod kątem emisji oraz tworzenia nagarów w komorze spalania. Temperatury destylacji są uzależnione od ilości biokomponentu zawartego w paliwie.

Wymogi co do jakości paliw i biopaliw są w Polsce regulowane dwutorowo: przez przepisy obowiązujące w Unii Europejskiej (dla oleju napędowego jest to norma podstawowa EN 590) oraz rozporządzenia Ministra Gospodarki, które zgodnie z polskim prawem mają status nadrzędnych. W dniu 8 września roku 2006 Minister Gospodarki działając na podstawie art. 4 ust. 2 Ustawy z dnia 23 stycznia 2004 r. o systemie monitorowania i kontroli jakości paliw i biopaliw ciekłych, wydał rozporządzenie zmieniające wcześniejszą decyzję w sprawie wymagań jakościowych dla paliw ciekłych. Wymogi względem składu frakcyjnego wynikające z ww. rozporządzenia zostały zaprezentowane w tabeli 7.7.1.

Tabela 7.7.1. Wymagania jakościowe dla składu frakcyjnego oleju napędowego zgodnie z rozporządzeniem Ministra Gospodarki z 2006 r.

Parametr i jednostka	olej napędowy			
	standardowy		o polepszonych właściwościach niskotemperaturowych	
	minimum	maksimum	minimum	maksimum
Do 250°C destyluje (V/V)	–	< 65	–	–
Do 350°C destyluje (V/V)	85	–	–	–
95 % (V/V) destyluje	–	360°C	–	–
Do 180°C destyluje (V/V)	–	–	–	10
Do 340°C destyluje (V/V)	–	–	95	–

Źródło: Wcisko, 2013

W biopaliwach typu FAME parametry takie jak lepkość oraz właściwości niskotemperaturowe, związane są bezpośrednio ze składem frakcyjnym. Biodiesel charakteryzuje się wyższymi temperaturami początku destylacji niż olej napędowy. Jest to niekorzystne, ponieważ do zasilania silników paliwem FAME paliwo musi być dobrze rozpylone, w celu zapewnienia dobrego odparowania. Wysoka temperatura wrzenia powoduje, że biodiesel spala się najlepiej przy dużych obciążeniach silnika, gdy temperatura w komorze spalania jest wysoka.

Skład frakcyjny badanych paliw określono na stanowisku badawczym wyposażonym w destylarkę HAD 620/1 firmy Herzog – rys. 7.7.1. Badania wykonano w laboratorium Małopolskiego Centrum Odnawialnych Źródeł Energii „BioEnergia”.

Celem badań było określenie składu frakcyjnego, czyli parametrów destylacyjnych biopaliw RME, wyprodukowanych samodzielnie oraz zakupionych na stacji paliw sieci „BLISKA”. Dodatkowo dla porównania uzyskane wyniki badań zestawiono z właściwościami handlowego oleju napędowego zakupionego na stacji paliw koncernu PKN Orlen. Wyniki badań zestawiono w tabeli 7.7.2.

Zgodnie z przypuszczeniami, najszybciej rozpoczyna destylować olej napędowy. Początek destylacji tego paliwa rozpoczyna się w temperaturze 178,1°C, natomiast koniec następuje w 363°C. Przy porównaniu własności destylacyjnych Biodiesli RME okazuje się, że w zależności od odmiany, destylacja może rozpoczynać się w różnych temperaturach. RME uzyskane z najkorzystniejszej odmiany zaczyna destylować w temperaturze prawie 20°C niższej niż RME z najmniej korzystnej odmiany, u której proces destylacji rozpoczął się znacznie powyżej 250°C. Do temperatury 250°C oddestylowano 36% (v/v) oleju napędowego oraz 0% biopaliw RME. Natomiast do 350°C oddestylowało, ponad 95% (v/v) oleju napędowego oraz odpowiednio 60% RME uzyskanego z oleju najkorzystniejszej odmiany rzepaku.



Źródło: Wciśło, 2013

Rysunek 7.7.1. Stanowisko badawcze wyposażone w destylarkę HAD 620/1 firmy Herzog

Tabela 7.7.2. Porównanie temperatur destylacji wyprodukowanego Biodiesla RME, z Biodieselem RME oraz ON ze stacji BLISKA (°C)

% (v/v) oddestylowania paliwa	100% Biodiesel RME (najmniej korzystny)	100% Biodiesel RME (najkorzystniejszy)	100% Biodiesel RME “BLISKA”	ON bazowy
0	307,2	279,8	304,3	178,1
5	312,6	288,6	310,4	192,4
10	321,3	293,6	319,0	202,3
15	336,6	309,3	334,5	216,1
20	342,5	316,2	339,2	222,5
25	346,4	322,1	345,7	234,9
30	351,6	325,6	347,8	241,2
35	354,2	329,2	349,0	248,5
40	358,7	333,2	351,6	255,9
45	360,2	336,8	352,9	263,7
50	362,7	341,2	356,9	270,9
55	363,2	343,5	358,6	279,5
60	365,3	347,4	360,0	287,6
65	367,1	350,3	361,4	295,4
70	368,2	352,3	362,7	305,7
75	369,1	355,4	363,9	313,8
80	369,9	356,3	365,1	320,9
85	371,5	357,9	368,5	329,7
90	375,2	359,3	370,7	340,7
95	378,4	364,8	372,6	347,9
100	394,1	376,2	389,8	363,0
	Parametr 97,8 kPa Oddestylowało 98,8%	Parametr 97,8 kPa Oddestylowało 98,2%	Parametr 97,8 kPa Oddestylowało 98,8%	Parametr 98,1 kPa Oddestylowało 98,9%

Źródło: Wcisto, 2013

W tabeli 7.7.3 zestawiono wartości najistotniejszych punktów krzywej destylacji badanych paliw, a więc temperaturę początku i końca destylacji oraz procent (v/v) oddestylowanych paliw do temperatury 250 i 350°C.

Tabela 7.7.3. Najistotniejsze punkty krzywej destylacji paliw

Paliwo	Początek destylacji (°C)	Do 250°C destyluje v/v (%)	Do 350°C destyluje v/v (%)	Ilość oddestylowanego paliwa v/v (%)
Olej napędowy	171,1	36,0	94,2	99,8
Biodiesel RME (najkorzystniejszy)	279,8	0	81,1	99,6
Biodiesel RME (najmniej korzystny)	307,2	0	59,4	99,4
B100 RME stacja BLISKA	304,3	0	43,8	99,1

Źródło: Wcisło, 2013

7.8. Określenie liczby cetanowej biopaliw typu Biodiesel RME oraz obliczenie indeksu cetanowego

Jednym z głównych parametrów decydujących o przydatności paliwa do zasilania silnika z zapłonem samoczynnym ZS jest liczba cetanowa. Liczbę cetanową oznacza się na jednocylinrowym silniku badawczym. Oznaczenie LC odbywa się na zasadzie porównania własności zapłonowych badanego paliwa z analogicznymi właściwościami mieszanek paliw wzorcowych o znanych liczbach cetanowych. W Polsce od listopada roku 2003 obowiązuje norma PN-EN ISO 5165, która wprowadza dwa rodzaje paliw wzorcowych tzw. wzorce pierwotne i wtórne. W stosunku do poprzednich norm zmieniła się m.in. skala LC, która w poprzedniej normie została zdefiniowana jako procent objętościowej zawartości cetanu w mieszaninie z α -metylonaftalenem (AMN). Cetan miał przypisaną wartość LC=100, natomiast AMN przypisano wartość LC=0. Począwszy od roku 1962, możliwa jest zamiana składnika o niskiej wartości LC, α -metylonaftalenu na heptametylononan, HMN. Wartość LC dla HMN wynosi 15. Obecnie zgodnie z normą PN-EN ISO 5165 wartość liczby cetanowej oblicza się ze wzoru $LC = \% \text{ cetanu (heksadekan) } + 0,15 (\% \text{ HMN})$.

Paliwa wzorcowe wtórne są to mieszanki sporządzone w proporcjach objętościowych dwóch wybranych mieszanin węglowodorowych oznaczonych jako „paliwo T” o dużej LC oraz „paliwo U” o małej LC, przy czym każdy zestaw paliw musi być wywzorcowany przez ASTM Diesel National Exchange Grup.

Liczbę cetanową wytworzonych biopaliw RME oznaczono na silnikowym stanowisku badawczym zgodnie z PN-EN ISO 5165. Jedno z nich zostało wyprodukowane z oleju ulepszonej odmiany rzepaku, czyli zawierającej podwyższoną ilość kwasu oleinowego w miejsce zmniejszonej ilości kwasu linolowego i linolenowego. W tabeli 7.8.1 zestawiono wyniki badań odmian, dla których uzyskano skrajnie różniące się wielkości LC.

Tabela 7.8.1. Oznaczenie liczb cetanowych Biodiesli RME własnej produkcji oraz paliwa ze stacji BLISKA

Paliwo	Liczba Cetanowa	Niepewność pomiaru
Biodiesel RME B100 z oleju rzepakowego z ulepszoną odmianą	57,4	$\pm 1,8$
Biodiesel RME B100 z oleju rzepakowego z odmiany tradycyjnej	56,2	$\pm 1,8$
Biodiesel RME B100 ze stacji BLISKA	56,4	$\pm 1,8$

Źródło: Wcisło, 2013

Liczba cetanowa badanych Biodiesli B100 RME zamykała się w przedziale od 56,2 do $57,4 \pm 3,6$, z czego wynika, iż LC Biodiesla RME uzyskanego z najkorzystniejszej odmiany może różnić się o około 2%. Biorąc jednak pod uwagę niepewność pomiaru, z jaką zgodnie z normą PN-EN ISO 5165 wyznaczona została liczba cetanowa, nie można wnioskować o ewentualnym pozytywnym wpływie ulepszonych odmian na LC RME.

Obliczanie indeksu cetanowego paliw ze średnich destylatów metodą równania czterech zmiennych oraz na podstawie nomogramów wg normy PN-EN ISO 4264:2001

Indeks cetanowy (IC) jest parametrem pomocniczym dla liczby cetanowej (LC). Wylicza się go na podstawie formuły matematycznej uwzględniającej temperatury odparowania, odpowiednio 10, 50 i 90% (v/v) biopaliwa RME oraz jego gęstość.

Indeks cetanowy dla biopaliw RME wyznaczono z zależności 7.8.1, która uwzględnia cztery zmienne.

$$IC = LC + 0,0892 \cdot T_{10} + [0,131 + 0,901B] \cdot T_{50} + [0,0523 - 0,42B] \cdot T_{90} + 0,00049 \cdot [T_{210N} - T_{290N}] + 107B + 60B^2 \quad (7.8.1)$$

gdzie:

T_{10} – temperatura oddestylowania 10% (v/v) RME (°C),

T_{50} – temperatura oddestylowania 50% (v/v) RME (°C),

T_{90} – temperatura oddestylowania 90% (v/v) RME (°C),

$B = [\exp(-0,0035 DN)]^{-1}$,

$DN = D - 850$, D – gęstość paliwa w temperaturze 15°C, ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

W tabeli 7.8.2 zestawiono wyniki obliczeń indeksu cetanowego dwóch wytworzonych RME o skrajnych własnościach paliwowych oraz RME ze stacji paliw BLISKA.

Tabela 7.8.2. Indeksy cetanowe Biodiesli B100 RME oraz IC RME ze stacji BLISKA

Paliwo	Indeks cetanowy
Biodiesel RME B100 z oleju ulepszanego rzepaku	58,2
Biodiesel RME B100 z oleju tradycyjnej odmiany	56,8
Biodiesel RME B100 ze stacji BLISKA	57,1

Źródło: Wcisto, 2013

Indeks cetanowy badanych Biodiesli B100 RME zamykał się w przedziale od 56,8 do 58,2, z czego można wnioskować, iż IC Biodiesla RME uzyskanego z najkorzystniejszej odmiany może różnić się o około 2,5% od biopaliwa RME wyprodukowanego z najmniej korzystnej odmiany.

7.9. Ocena wpływu temperatury na własności reologiczne Biodiesli RME oraz oleju napędowego

Do głównych parametrów decydujących o przydatności biopaliw, a szczególnie tych stosowanych do zasilania silników z zapłonem samoczynnym jest lepkość i gęstość. Spośród wymienionych parametrów stosunkowo dużą amplitudą zmian wartości parametru w funkcji temperatury charakteryzuje się lepkość, zarówno kinematyczną jak i dynamiczną. Normy jakościowe PN-EN 590:2009 dla oleju napędowego oraz EN ISO 3104 dla FAME określają jedynie lepkość kinematyczną. Jak dotychczas nie wprowadzono normy obligatoryjnej na bezpośrednie wyznaczanie lepkości dynamicznej.

Lepkość kinematyczna jest to parametr określający opór przepływu, na jaki napotyka ciecz pod wpływem sił grawitacyjnych. Dotychczas lepkość dynamiczną wyznaczano pośrednio z kinematyczną, obliczano ją z kinematycznej, ponieważ nie było odpowiednich narzędzi lub były one stosunkowo drogie. W ostatnich latach można zaobserwować bardzo dynamiczny rozwój reometrów, szczególnie rotacyjnych, dzięki którym w bardzo precyzyjny sposób można wyznaczać lepkość dynamiczną. Dodatkowo, dla lepszej oceny własności mechanicznych paliw, można wyznaczać wpływ wielu parametrów reologicznych na zachowanie się paliwa czy biopaliwa. Do zalet stosowania reometrów rotacyjnych do wyznaczania lepkości należą: mała objętość potrzebnej próbki paliwa (wystarczy około 50 ml), pełna automatyzacja i komputeryzacja pomiarów, możliwość badania cech lepkich jak i sprężystych oraz możliwość badania zjawisk tiksotropii i antytiksotropii.

Lepkość dynamiczna jest miarą oporu przepływu lub deformacji cieczy (polska norma PN-EN ISO 3104), która wpływa również na przebieg wtrysku, zasięg strugi i rozpylanie paliwa w komorze spalania silnika. Ma ona również znaczenie dla własności smarnych, co jest szczególnie ważne w przypadku rotacyjnych pomp wtryskowych, ponieważ w tego typu pompach smarowanie elementów pompy odbywa się przy pomocy oleju napędowego. Prawdopodobnie z tego powodu niekiedy sądzi się, że mała lepkość i wynikające z niej dobre własności przepływowe są ważniejsze dla rozruchu silnika niż liczba cetanowa

(Szlachta i in., 2000). Istnieje również ścisła zależność między lepkością a temperaturą i prędkością ścinania.

Nadmierna lepkość niektórych biopaliw jest bardzo poważnym problemem, który w ostatnich latach urósł do rangi jednego z kluczowych. Wiąże się to przede wszystkim ze stosowaniem aparatury wtryskowej, która podaje paliwo do silnika przy ciśnieniu dynamicznym dochodzącym do 2600 bar. Dlatego nawet niewielkie zwiększenie wartości tego parametru może się odbić negatywnie na pracy aparatury wtryskowej. O tym, że biopaliwa będą wchodziły na rynki paliwowe było wiadomo już w roku 1997, dlatego producenci powinni byli dostosować układy wtryskowe również do zastosowania paliw o 20 do 40% większej lepkości.

Pewnym problemem jest też jakość Biodiesla. Okazuje się że w FAME często występuje więcej produktów niecałkowitej konwersji oleju w estry uzyskiwanych w procesie transestryfikacji. Norma EN 14214 na biopaliwo typu Biodiesel FAME podaje, że monoacylogliceroli może być w paliwie maksymalnie – 0,8% (m/m), natomiast diacylogliceroli – tylko 0,2% (m/m). Pewnym problemem jest też złe oddzielenie fazy estrowej od glicerynowej. Tymczasem pozostawienie nawet śladowych ilości fazy glicerynowej powoduje znaczny wzrost lepkości.

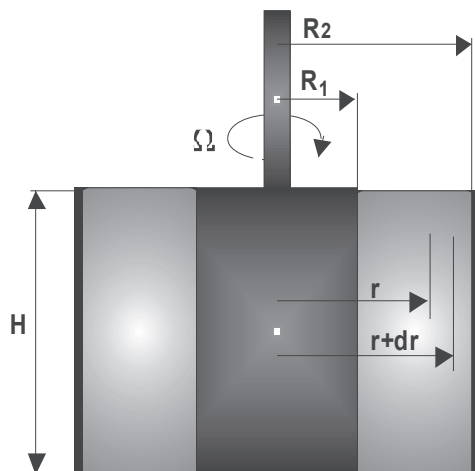
Na rysunku 7.9.1 przedstawiono stanowisko badawcze do wyznaczania własności reologicznych paliw i biopaliw.



Źródło: Wcisło, 2009

Rysunek 7.9.1. Stanowisko badawcze do wyznaczania lepkości dynamicznej, wyposażone w reometr firmy Anton Paar oraz wannę termostatyczną firmy Grant

W reometrze zastosowano układ pomiarowy o dwóch cylindrach współosiowych. Na rysunku 7.9.2 zaprezentowano schemat ideowy układu pomiarowego z zaznaczeniem wielkości, przy pomocy których wyprowadzono główne zależności na moment skręcający, szybkość ścinania oraz lepkość dynamiczną.



Źródło: Wcisło, 2009

Rysunek 7.9.2. Układ pomiarowy o cylindrach współosiowych: Ω – częstość obrotowa wirującego elementu, M – moment skręcający działający na osi wirującego elementu, H – wysokość próbki, r – odległość od osi obrotu, R_1 – promień zewnętrzny wrzeciona reometru, R_2 – promień wewnętrzny tulei cylindra

Przy założeniu, że rozważana próbka ma wysokość H , siła styczna w płynie w odległości r od osi obrotów może być wyrażona zależnością 7.9.1. Uwzględniając częstość obrotową wirującego elementu oraz średnicę zewnętrzną elementu wirującego R_1 i średnicę wewnętrzną wypełnionej badanym płynem tulei R_2 , możemy wyprowadzić zapisaną wzorem 7.9.2 zależność na siłę ścinającą. Moment skręcający wywołwany przez siłę styczną można zapisać ogólnie w postaci $M = F \cdot r$. Natomiast dla układu zastosowanego w reometrze, czyli układu pomiarowego o cylindrach współosiowych, moment skręcający może być wyrażony wzorem 7.9.3. Siły tarcia stycznego przenoszone przez płyn na cylinder wewnętrzny powodują powstawanie opisanego momentu skręcającego M . Uwzględniając powyższe założenia, zależność na lepkość dynamiczną przy zastosowaniu układu pomiarowego o cylindrach współosiowych można zapisać wzorem 7.9.4.

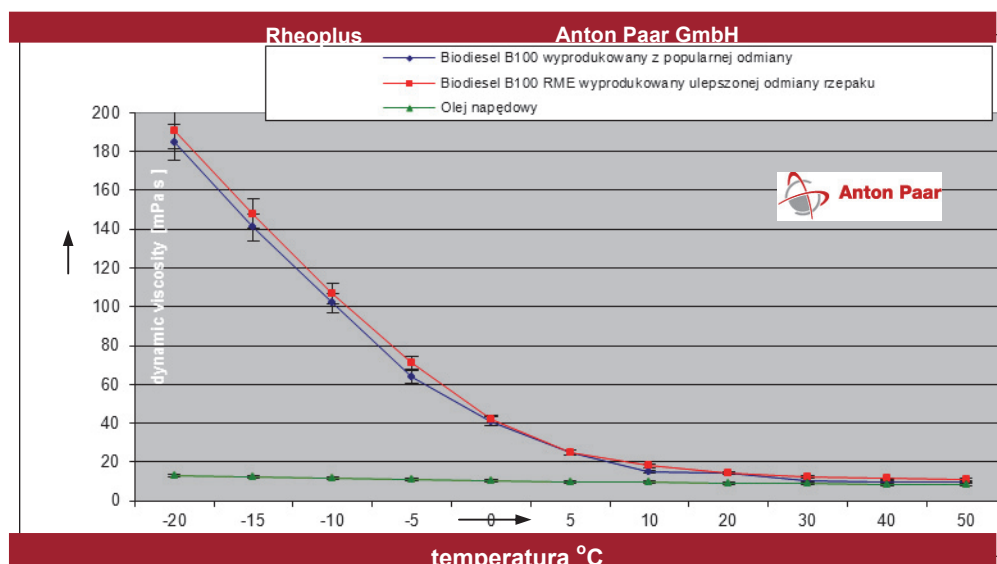
$$F_r = 2\pi r H \tau_r \quad (7.9.1)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{2\Omega}{1 - \frac{R_1^2}{R_2^2}} \quad (7.9.2)$$

$$M = \frac{4\pi\eta H \Omega}{\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2}} \quad (7.9.3)$$

$$\eta = \frac{1}{4\pi H} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \frac{M}{\Omega} \quad (7.9.4)$$

Na rysunku 7.9.3 zaprezentowano wykres zależności lepkości dynamicznej od temperatury.



Źródło: Wciśło, 2013

Rysunek 7.9.3. Wpływ temperatury na lepkość dynamiczną Biodiesla RME oraz, dla porównania, oleju napędowego

Rysunek 7.9.3. wskazuje, że wraz z obniżaniem temperatury rośnie lepkość dynamiczna badanych paliw, przy czym zakres zmian jest różny, a najmniejszy dla oleju napędowego. Lepkość dynamiczna oleju napędowego w temperaturze 50°C wynosi 7,4 mPa s, a wraz z obniżaniem się temperatury rośnie, by w -20°C osiągnąć wartość 17,3 mPa s. Z kolei lepkość dynamiczna Biodiesla B100 RME w temperaturze 50°C przyjmowała wartość 12 mPa s, natomiast po obniżeniu temperatury do -20°C wynosiła już od 184 do 193 mPa s. Wynika stąd, że lepkość biopaliw RME w niskiej temperaturze jest około dziesięciokrotnie wyższa niż oleju napędowego. Biodiesle RME wyprodukowane z różnych genetycznie odmian rzepaku zachowują się w funkcji temperatury podobnie: nie widać istotnych różnic lepkości.

8. KSZTAŁTOWANIE CECH FIZYCZNYCH I CHEMICZNYCH BIOPALW RME W ASPEKTCIE DOBORU ODMIAN RZEPAKU I EKSPLOATACJI POJAZDÓW ROLNICZYCH

8.1. Materiał i metody badawcze

Prace badawcze prowadzone na Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki przy współpracy z Instytutem Technologii Nafty (ITN) w Krakowie wykazały znaczne rozbieżności parametrów badanych próbek RME pochodzących z różnych agorafinerii w stosunku do wartości określonych normą EN 14214:2003 i jej krajowym odpowiednikiem PN-EN14214:2004; odnośnie wymagań jakościowych paliw dla silników z zapłonem samoczynnym. Z punktu widzenia kształtowania procesu wtrysku paliwa i etapów tworzenia faz procesu spalania w komorze silnika, zjawisko różnorodności parametrów biopaliw nakłada się na zasadnicze różnice cech fizyko-chemicznych RME i ON. Ponadto należy uwzględnić wyniki badań laboratoryjnych procesów starzeniowych RME w określonych warunkach i czasie przechowywania, a także podatność na rozkład mikrobiologiczny i właściwości niskotemperaturowe biopaliw. Skłonność do tworzenia osadów wokół otworów wylotowych rozpylaczy wynika już z cech wytlóconego oleju rzepakowego z rozróżnieniem wielonienasyconych kwasów tłuszczowych, zwłaszcza kwasu linolowego i linolenowego o odpowiednio dwóch i trzech wiązaniach podwójnych w łańcuchu węglowym (Bocheński, 2003).

Obecność tych kwasów skutkuje przy produkcji biopaliw skłonnością do utleniania i polimeryzacji. Badania procesów destrukcji (elastomerów i metali konstrukcyjnych stosowanych w układzie paliwowym pojazdów rolniczych) przeprowadzone zostały z udziałem otrzymanego RME z dogodnej do produkcji biodiesla odmiany rzepaku jaką jest odmiana Kontakt. Wykazano, iż odmiana Lisek o całkowicie odmiennym profilu kwasów tłuszczowych zawiera ponad dwukrotną ilość kwasu linolowego w stosunku do odmiany Kontakt. Ponad dwukrotnie mniejsza ilość kwasów wielonienasyconych – linolowego ($C_{18:2}$) i linolenowego ($C_{18:3}$) w oleju rzepakowym nadaje odmianie Kontakt właściwą przydatność do produkcji biodiesla ze względu na wymaganą wysoką zawartość kwasu oleinowego (o jednym podwójnym wiązaniu) wyższą o ok. 70% w stosunku do pozostałych odmian.

Nasiona zebrane w terminie opóźnionym zbioru wykazują niższą zawartość kwasów nasyconych oraz wielonienasyconych w wytlóconym oleju rzepakowym głównie przez wzrost udziału kwasów jednonienasyconych (oleinowego $C_{18:1}$) przyczyniającego się do poprawy cech biopaliwa. Wykazano wpływ parametrów tłoczenia oleju rzepakowego na zawartość kwasów tłuszczowych i glicerolu dokonując zmian prędkości obrotowej śruby tłoczącej oraz przekroju dyszy roboczej. Zawartość tych kwasów zależy nie tylko od rodzaju i stopnia dojrzałości ziarna, ale również od miejsca upraw i warunków klimatycznych. Kwasy tłuszczowe mają wpływ na pracę katalizatora silnika, a zwiększona

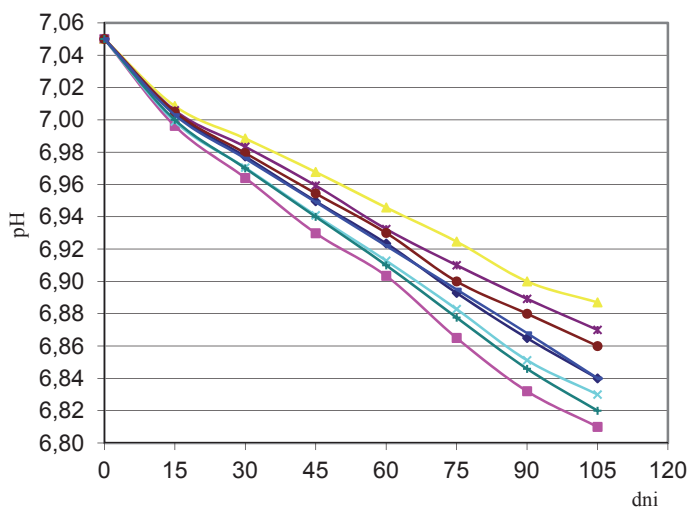
obecność kwasów nienasyconych powoduje wzrost emisji sadzy. Oleje niskiej jakości mogą zawierać więcej zanieczyszczeń, takich jak: fosfolipidy, wolne kwasy tłuszczowe, barwniki, wodę. Wartość liczby kwasowej biopaliwa wraz z oznaczoną obecnością wolnych kwasów tłuszczowych nie powinna przekraczać wartości dopuszczalnej ze względu na zwiększenie ilości mydeł w procesie transestryfikacji. Niezbędne jest ograniczenie liczby jodowej wskazującej na obecność nienasyconych kwasów tłuszczowych, odpowiedzialnych za odkładanie osadów.

W ramach prac badawczych prowadzonych na Wydziale Agrotechnologii w latach 2006-07 dokonano oceny zmian wskaźnika pH - kwasowości olejów otrzymanych z ośmiu odmian rzepaku poddanych przechowywaniu w okresie 105 dni w różnych warunkach, przyjmując dobór materiału pojemników zgodnie z realiami praktyki. Celem badań było wskazanie odmian rzepaku, z których uzyskany olej będzie odznaczał się niskim wzrostem wskaźnika kwasowości wyznaczanego na podstawie pomiarów pH-metrem (rys. 8.1.1), a także określenie przyczyn tego stanu.

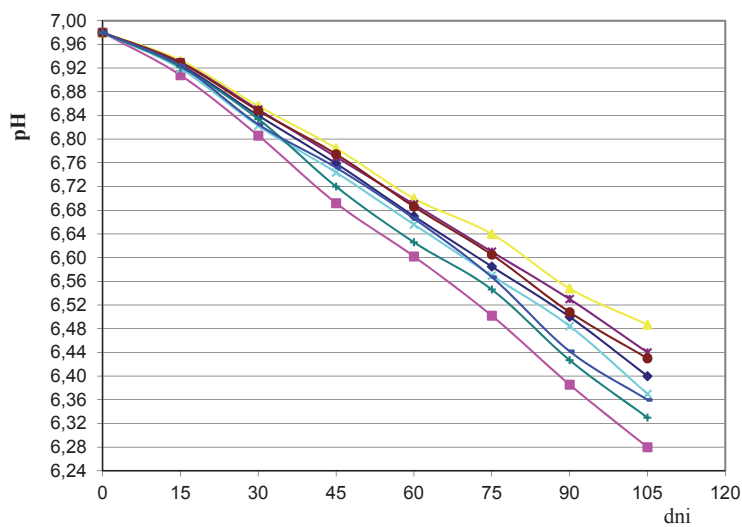


Rysunek 8.1.1. Przyrząd pomiarowy – PH- metr firmy TESTO model 230

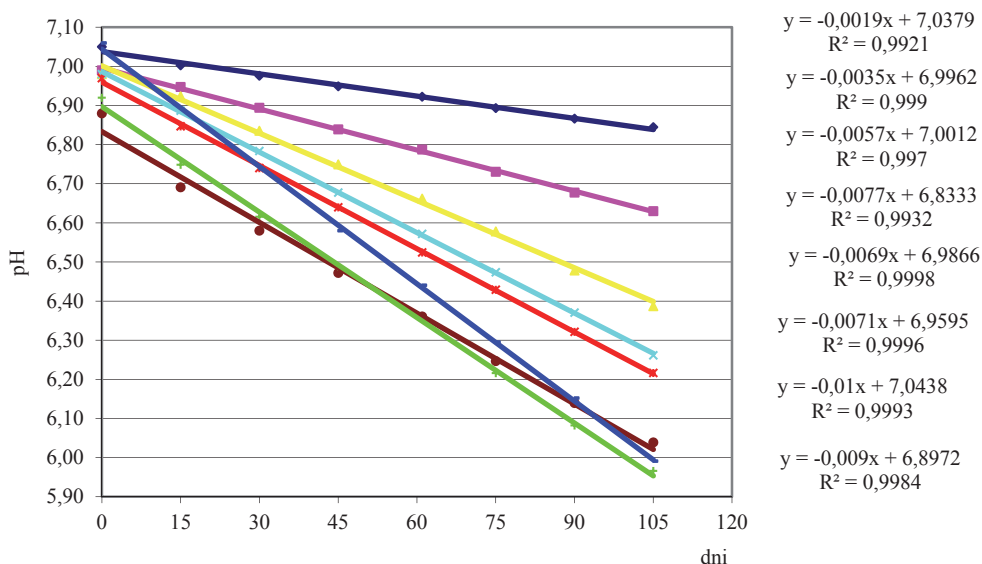
W celu wyeliminowania wpływu rodzaju gleby oraz warunków pogodowych, nasiona ośmiu odmian rzepaku zostały pozyskane z Instytutu Hodowli Roślin Strzelce oddział Borowo. Odmiany rzepaku, na których wykonywano badania to: Kaszub, Heros, Kano, Mozart, Sponsor, Rasmus, Landmark i Lirajet. Proces wyłaczania został dokonany na wyłaczarce olejowej firmy KOMET przy zastosowaniu metody jednostopniowego tłoczenia na zimno bez ekstrakcji reszty oleju z wyłoków. We wszystkich ośmiu analizowanych odmianach nastąpił spadek pH, co zostało przedstawione na rys. 8.1.2-8.1.4. Można zauważyć, że odmiana Kaszub charakteryzuje się najmniejszą rozpiętością wyników pomiarów dla skrajnych próbek, co świadczy o niskiej wrażliwości tej odmiany na rodzaj i warunki w jakich jest przechowywany olej, odwrotny przebieg można natomiast zaobserwować w odmianie Landmark.



Rysunek 8.1.2. Zmiana pH w przedziałach czasu przechowywania oleju rzepakowego wyłoczonego z odmiany Kaszub



Rysunek 8.1.3. Zmiana pH w przedziałach czasu przechowywania oleju rzepakowego wyłoczonego z odmiany Landmark



Rysunek 8.1.4. Zmiana pH podczas przechowywania dla oleju rzepakowego wytłoczonego z odmiany Rasmus

8.2. Zmienność cech biopaliw RME

Odmienny przebieg procesów starzenia FAME sprawia, że klasyczne metody oceny skłonności paliw do utleniania, wykorzystywane od wielu lat w badaniach ON nie odzwierciedlają tych procesów w paliwach estrowych. Właściwości fizyko-chemiczne RME ulegają zmianie, zwłaszcza w wyniku niekorzystnych warunków ich przechowywania. Tymi niekorzystnymi warunkami są: wysoka temperatura, dostęp światła i powietrza oraz obecność metali katalizujących proces utleniania. Procesy starzenia estrów metylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego przebiegają zdecydowanie szybciej w stosunku do oleju napędowego. Skala procesu zależy nie tylko od jakości surowca, ale także od wyboru technologii produkcji RME, oraz sposobu oczyszczania produktu. Według Prankla optymalne warunki przechowywania RME to: temperatura +4°C, pojemnik z utwardzonego polietylenu i ograniczony dostęp powietrza.

Jednym z istotnych kryteriów oceny jakości estrów metylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego jako paliwa silnikowego jest określenie całkowitej zawartości gliceryny oraz wolnej gliceryny, mono-di- i triglicerydów. Zgodnie z wymaganiami normy EN 14214 zawartość glicerydów (%(m/m)) przyjmuje dopuszczalne maksymalne poziomy: monoglicerydy do 0,8, diglicerydy do 0,2, triglicerydy do 0,2, przy czym zawartość wolnej gliceryny kształtuje się na poziomie do 0.02%(m/m). Wynikowa zawartość estrów metylowych kwasów tłuszczowych po uwzględnieniu dopuszczalnych poziomów glicerydów,

wolnej gliceryny oraz dodatków uszlachetniających paliwo powinna wynosić co najmniej 96,5% (m/m). Okresowość wykorzystania sprzętu rolniczego zasilanego RME przy podwyższonej zawartości wolnej gliceryny może stwarzać problemy eksploatacyjne związane z tendencją gliceryny do wytrącania osadów. Wysoki poziom całkowitej zawartości gliceryny może prowadzić do zanieczyszczenia końcówek wtryskiwaczy, tworzenia osadów na denku tłoków i w komorach spalania silników.

Pomiary przeprowadzone z wykorzystaniem chromatografu, pozwoliły ustalić poziom glicerydów dla pozyskanego paliwa z laboratorium biopaliw WA na linii W60 - PROMAR (rys. 8.2.1.) oraz dla atestowanego paliwa pochodzącego z Rafinerii Trzebinia S.A.

Należy również podkreślić, że niektóre parametry są bardzo zbliżone lub niewiele różnią się od wymagań ON, a niektóre są nawet korzystniejsze – jak np. pomijalna zawartość siarki, czy też wyższa temperatura zapłonu. Porównanie właściwości fizyko-chemicznych oleju napędowego i estrów metylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego przedstawiono w tabeli 8.2.1.

Najbardziej uniwersalnym kryterium przydatności cech paliwa dla potrzeb współczesnego silnika z ZS jest liczba cetanowa (LC). W praktyce badań silnikowych LC stanowi jedynie uniwersalny wskaźnik porównawczy paliw, a nie parametr fizyczny, gdyż oznaczana jest na podstawie pomiaru całkowitego opóźnienia samozapłonu bez rozróżniania fizycznego i chemicznego aspektu tego wskaźnika.

Wspomniane różnice w składzie chemicznym ON i RME wyznaczają inny przebieg procesu samozapłonu tych paliw w warunkach współczesnego silnika o wysokim stopniu sprężania i doładowaniu, co wprowadza rozbieżności w ocenie LC metodą silnikową i laboratoryjną. W tym przypadku należy posłużyć się pomocniczym parametrem oceny paliw, jakim jest szybkość narastania ciśnienia w drugiej fazie procesu spalania.



*Rysunek 8.2.1. Prasa śrubowa i estryfikator W60 firmy PROMAR
– laboratorium biopaliw WA*

Tabela 8.2.1. Porównanie właściwości fizyko-chemicznych ON i RME

Wyszczególnienie	Olej napędowy		Estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego
	Wartość średnia	Zakres rozrzutu	
Gęstość w temp. 15°C, (kg·dm ⁻³)	0,83	0,817–0,856	0,86–0,90
Lepkość kinetyczna w temp. 20°C, (mm ² ·s ⁻¹)	3,80	2,90–8,50	6–9
Wartość opałowa, (MJ·kg ⁻¹)		42,7–43,5	37,0–37,2
Wartość opałowa, (MJ·dm ⁻³)		25,69–35,75	32,4–33,1
Liczba cetanowa LC	52,3	47,10–58,60	45–59
Masa molowa, (kg·kmol ⁻¹)		120–320	296
Stechiometryczne zapotrzebowanie na powietrze, (kg·kg ⁻¹)	14,57		12,5
Analiza elementarna			
– C, (%)		86,0–86,4	76,8–78,0
– H, (%)		13,4–14,0	12,1
– O, (%)		–	10,0–11,0
CFPP, (°C)		2–35	-7 – -9
Liczba Condradsona, (M%)		0,01–0,04	<0,01–0,05
Zawartość siarki, (%)	0,137	0,03–0,22	0,02–0,006
Temperatura zapłonu, (°C)	53,0	20–84	111–175
Zawartość związków aromatycznych, % (V/V)	21,5		–

Źródło: Jakóbiec, 2005

Procesy degradacji paliw silnikowych są bardzo skomplikowane, stąd zachodzące reakcje utleniania węglowodorów zawartych w ON i RME można zaliczyć do wolnorodnikowych reakcji łańcuchowych przebiegających etapowo w fazie ciekłej. Ocena stabilności oksydacyjnej badanych próbek RME wykazała, że próbki pozbawione inhibitorów reakcji utleniania, przechowywane w niekorzystnych warunkach tracą swoją stabilność oksydacyjną ocenianą wg z PN–EN 14112, przy czym najszybciej proces oksydacji zachodzi w próbkach przechowywanych w obecności wody i bakterii.

Badania laboratoryjne obejmowały również ocenę odporności RME na utlenianie wg PN–ISO 12205. Wykazano zwiększony udział masowy powstających osadów w początkowym okresie przechowywania, lecz po okresie jednego roku całkowita ilość osadów niezależnie od ich warunków przechowywania, była podobna i wynosiła ok. 200 g·m⁻³.

Paliwa estrowe wykazują podatność na rozkład mikrobiologiczny, gdyż rozwój mikroorganizmów wywołany jest obecnością wydzielonej wody powstałej w wyniku zmian dobowych temperatury zbiornika oraz kondensacji pary wodnej. Ograniczenie zawartości wody do 0,1% jest niezbędne ze względu na polimeryzację kwasów tłuszczowych i możliwość wystąpienia zatarcia sekcji tłoczących pompy wtryskowej oraz iglicy rozpylacza we wtryskiwaczu.

Biopaliwa w stosunku do ON są bardziej podatne na rozkład mikrobiologiczny i stanowią doskonałą pożywkę dla ich rozwoju. Problemy logistyczne pojawiające się podczas magazynowania, transportu i przechowywania RME skutkują obecnością i rozwojem mikroorganizmów w paliwach, co jest przyczyną wytrącania się osadów w zbiornikach z następstwem ograniczenia przepustowości materiałów filtracyjnych w układzie paliwowym silnika. Zawartość wody powyżej $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ jest przyczyną znacznego rozwoju bakterii w oleju rzepakowym, jak i w RME, co osłabia stabilność tych produktów. Rozwój mikroorganizmów może być hamowany przez stosowanie biocydów. Badania prowadzone przez ITN wykazały, iż warunki symulowanego starzenia, w jakich przechowywano RME przez dodanie wody skażonej mikrobiologicznie w ilości 0,25% (V/V), nie wpłynęły na przyspieszenie procesów degradacji estrów; zaobserwowano jednak wzrost lepkości paliwa.

Podstawowym problemem eksploatacyjnym silników zasilanych mieszaninami RME i ON jest zapewnienie właściwego rozruchu silnika już w temperaturze $+5^{\circ}\text{C}$, przy czym należy podkreślić, że właściwości niskotemperaturowe RME są zdecydowanie gorsze niż ON. Przyczyną tego stanu jest jednolitość związków chemicznych wchodzących w skład RME powodujących zwiększoną skłonność do tworzenia szlamów. Poprawę właściwości niskotemperaturowych RME uzyskać można eliminując udział grup estrowych o wyższej liczbie atomów węgla w cząsteczce, natomiast większy udział nienasyconych wiązań w cząsteczce estru poprawia omawiane właściwości. Właściwości reologiczne można polepszyć poprzez dobór odpowiedniej jakości depresatora stopniując skalę zjawiska na etapach temperatury: mętnienia paliwa (CP), zablokowania zimnego filtra (CFPP), symulowanej temp. blokady filtra (SFPP), płynięcia paliwa (PP).

8.3. Badania laboratoryjne elastomerów

Istotnym etapem prac badawczych prowadzonych na Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki są zagadnienia destrukcji elastomerów jako uszczelniaczy pompy wtryskowej oraz pierścieni uszczelniających wał korbowy i rozrządu silnika, poddanych działaniu oleju silnikowego wzbogacanego paliwem estrowym jako skutków przedmuchów do skrzyni korbowej. Badania porównawcze miały na celu określenie spadku cech wytrzymałościowych próbek uszczelniaczy poddanych czasowemu działaniu oleju silnikowego wzbogacanego udziałem RME.

Celem badań było wyznaczenie tempa destrukcji uszczeltek i przewodów elastycznych paliwowych w funkcji czasu i temperatury w procesie oddziaływania RME. Wnioskowanie zostało ukierunkowane na potrzebę ewentualnych modyfikacji składu mieszanek elastomerowych. Zakres prac obejmował opracowanie procedury testów kontrolnych w przedziałach czasu wyznaczonych okresem prac polowych i przestoju sprzętu rolniczego. Ocenie poddano proces destrukcji wybranych materiałów aparatury paliwowej i uszczelniaczy silnika. Istotne jest określenie czasu, w którym następują największe zmiany cech elastomerów wg przyjętej skali procentowej oceny procesów destrukcji materiałów.

Badania przeprowadzono dla próbek testowych pobranych z uszczelnień silnika ciągnika, poddanych czasowemu działaniu paliwa RME w warunkach laboratoryjnych i eksploatacyjnych. Sporządzono procedurę badań procesu destrukcji elastomerów, na którą składają się serie trzech pomiarów próbek materiałów w aspekcie:

- zmiany masy,
- zmiany wymiarów geometrycznych,
- zmiany właściwości wytrzymałościowych przy rozciąganiu (wg PN-ISO1817:2001).

Pierwsza seria pomiarów wykonywana była na odpowiednio przygotowanych próbkach pobranych z uszczelniaacza wału korbowego, które poddano działaniu RME. Po okresie 50 i następnie 105 dni wykonano drugą i trzecią serię pomiarów. Do badań właściwości wytrzymałościowych wykorzystano maszynę firmy MTS Insight2, w której odczyt siły i wydłużenia jest wykonywany podczas nieprzerwanego rozciągania próbki do chwili jej zerwania (rys. 8.4.1). Masę próbek określano za pomocą wagi laboratoryjnej, a pomiary wielkości geometrycznych przeprowadzono za pomocą suwmiarki oraz mikrometra. Badanie cech RME ograniczyło się do oznaczenia liczby kwasowej, zaraz po wyprodukowaniu paliwa oraz po okresie 105 dni. Paliwo do badań uzyskano w laboratorium na WA UR w Krakowie, przy zastosowaniu metody jednostopniowego tłoczenia w prasie firmy KOMET i transestryfikacji w reaktorze W60 firmy PROMAR. Parametry testowego paliwa to: gęstość

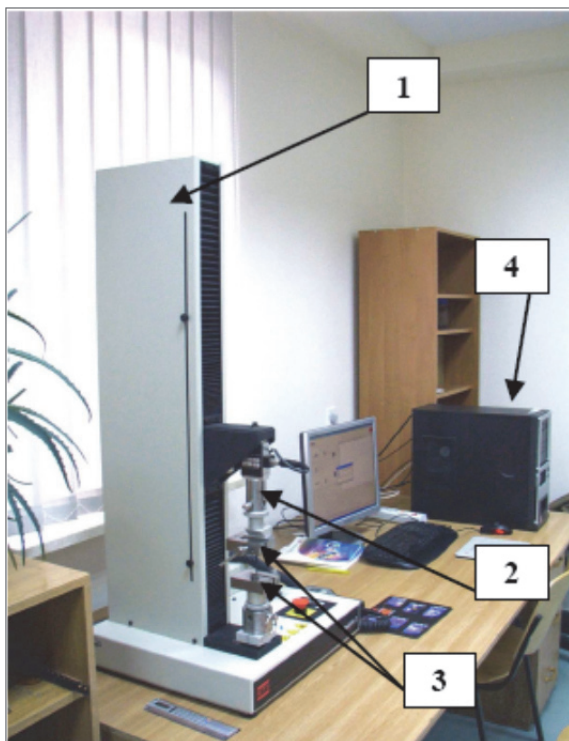
w temperaturze 15°C $884 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, wartość opałowa $40,4 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, liczba kwasowa $0,35 \text{ mg KO} \cdot \text{Hg}^{-1}$ (wg PN-EN 14104), ciepło spalania $38,9 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Po upływie czasu testowego wykonano ponownie pomiary liczby kwasowej, które wykazały, iż dla wszystkich warunków termicznych przechowywania próbek liczba kwasowa przekroczyła wartości dopuszczone wg normy PN-EN 14213. W temperaturze -1°C wartość liczby kwasowej wzrosła do $0,8 \text{ mg KO} \cdot \text{Hg}^{-1}$, w temperaturze pokojowej do $0,7 \text{ mg KO} \cdot \text{Hg}^{-1}$, a w warunkach komory silnika do $0,9 \text{ mg KO} \cdot \text{Hg}^{-1}$.

8.4. Oznaczenie wybranych właściwości badanych elastomerów

Procedura testów kontrolnych do oceny destrukcji elastomerów, oparta była na metodyce zawartej w normie PN-ISO1817:2001. Wybrane do badań elastomery używane w silnikach z zapłonem samoczynnym pochodziły z uszczelki misy olejowej, uszczelniaacza wału korbowego oraz przewodu paliwowego silnika ciągnika rolniczego MF 255. Za pomocą prasy i wykrojnika wykonano do każdej serii pomiarów po trzy próbki w kształcie „wiosелеk” zgodnie z procedurą normy PN-ISO37. Podstawowymi wartościami zaleconymi przez PN-ISO 37:1998 mierzonymi podczas testu są:

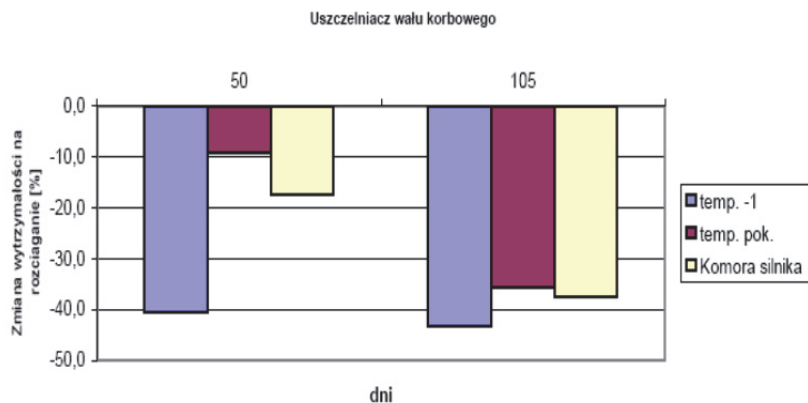
- wytrzymałość na rozciąganie TS jako maksymalne naprężenie przy rozciąganiu, zarejestrowane podczas rozciągania próbki do chwili jej zerwania,
- wytrzymałość na rozciąganie przy zerwaniu TS_b jako naprężenie przy rozciąganiu, zarejestrowane w chwili zerwania,
- długość odcinka pomiarowego („wiosелеk”) oraz wydłużenie przy zerwaniu E_b .



Rysunek 8.4.1. Stanowisko do badania wytrzymałości MTS Insight2 w laboratorium Katedry Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki, 1 – maszyna MTS Insight2, 2 – głowica, 3 – szczęki głowicy do mocowanie próbki, 4 – komputer PC do rejestracji danych

8.5. Wyniki i dyskusja

Wyniki pomiarów pierwszej serii zostały uznane za wartości bazowe (0%), przy kolejnych pomiarach (po 50 i 105 dniach) każde odchylenie wartości w górę to +X%, a spadek w stosunku do wartości odniesienia to -X%. Największy spadek wytrzymałości na rozciąganie (rys. 8.5.1.) pokrywający się ze zmianą wytrzymałości przy zerwaniu próbki wystąpił już po 50 dniach oddziaływania RME w temperaturze -1°C (spadek o 40,5%). Próbki przechowywane w strefie głowicy silnika wykazały spadek wytrzymałości o ok.17,3%, natomiast próbki pozostawione w temp. pokojowej wykazały najniższy spadek na poziomie 9,3%.

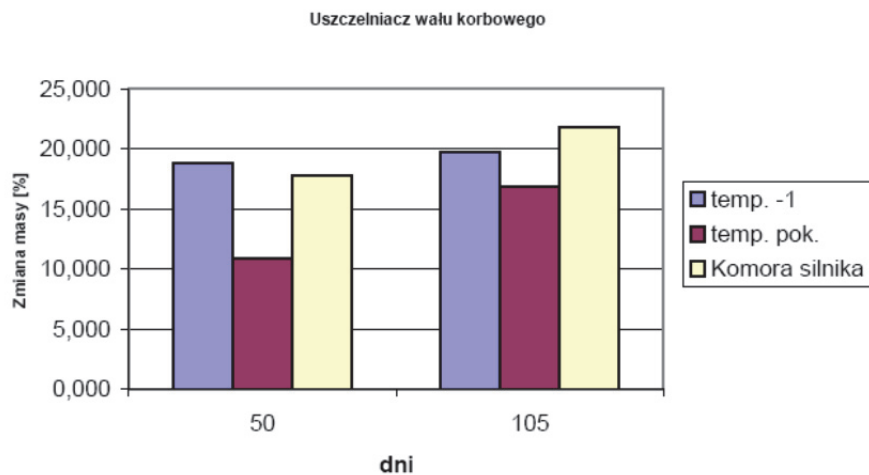


Rysunek 8.5.1. Zmiana wytrzymałości na rozciąganie próbki uszczelniacza wału korbowego silnika – analogia w stosunku do przebiegu wytrzymałości na rozciąganie przy zerwaniu próbki

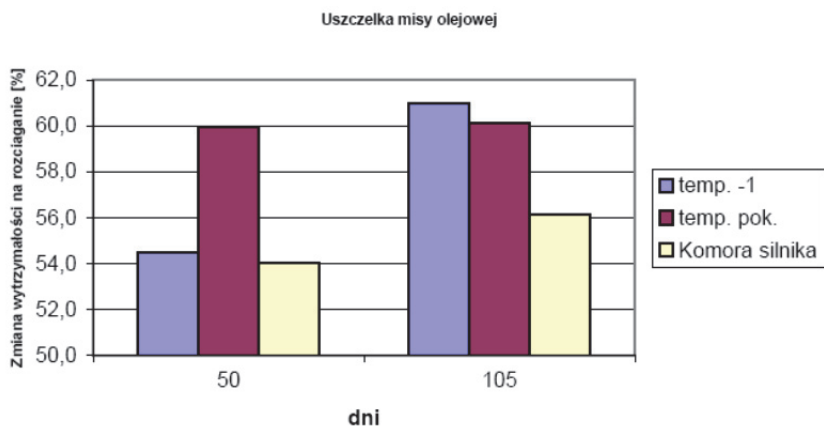
W drugiej serii pomiarowej (po 105 dniach) nastąpił dalszy spadek wyżej wymienionych parametrów i dla próbki umieszczonej w temperaturze pokojowej zanotowano obniżenie wytrzymałości na rozciąganie do 26%. Wartości wytrzymałości na rozciąganie i wytrzymałości na rozciąganie przy zerwaniu są identyczne co oznacza, że po osiągnięciu granicy plastyczności próbka jest zerwana. Analogicznie próbki umieszczone w temperaturze ujemnej wykazały największy spadek wydłużenia przy zerwaniu.

Największy przyrost masy (rys. 8.5.2.) odnotowały próbki umieszczone w komorze silnika; po pierwszej serii pomiarowej; wartości oscylowały w zakresie 18%, a podczas drugiej serii nastąpił przyrost masy średnio o 3%.

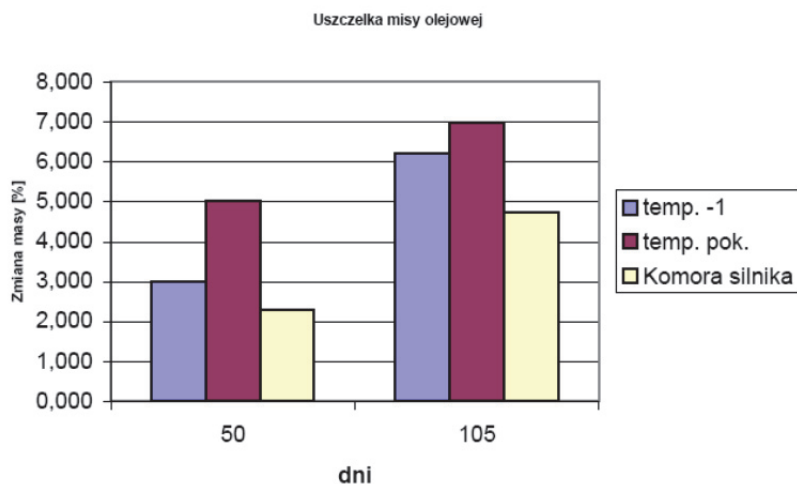
W silnikach ZS, przecieki paliwa do układu smarowania mają wpływ na zmianę właściwości fizykochemicznych oleju silnikowego; w tym obniża się jego lepkość ale również występuje destrukcja uszczeltek wykonanych z elastomerów i kompozytów na bazie elastomerów. Podczas przeprowadzonych badań próbki pobrane z uszczelki misy olejowej wykazały wprawdzie wysoki przyrost wytrzymałości na rozciąganie (rys. 8.5.3.), lecz równocześnie zaznaczył się przyrost masy badanej uszczelki (rys. 8.5.4.). Wywołuje to efekt wypływania uszczelnienia poza granice krawędzi uszczelnień na złączach misy olejowej ze skrzynią korbową silnika prowadząc do wzrostu naprężeń złączy śrubowych. Badania wytrzymałości na rozciąganie (rys. 8.5.5.) i wytrzymałości na rozciąganie przy zerwaniu wykazały, że elastomer z którego wykonany jest przewód paliwowy jest najbardziej odporny spośród badanych elastomerów na warunki założone w doświadczeniu. Spadek tych parametrów mieścił się w granicy 11%. Anomalią w stosunku do poprzednich badanych elastomerów można nazwać wzrost wydłużenia przy zerwaniu o 29,3%. Największy wzrost masy – prawie o 30% – (rys. 8.5.6.) odnotowały próbki będące w warunkach panujących w komorze silnika.



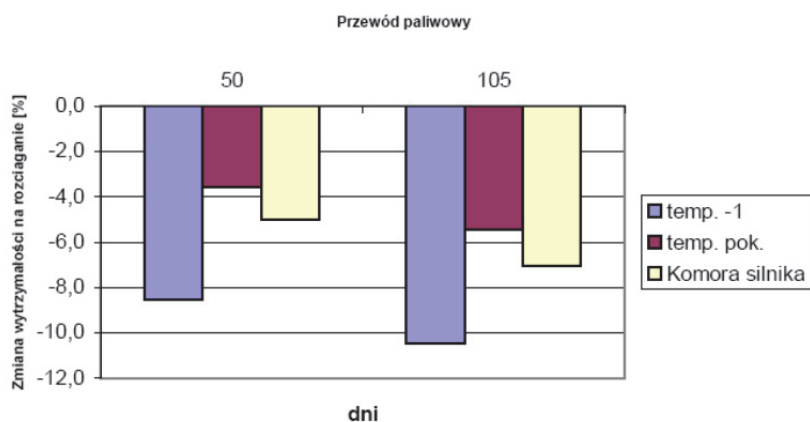
Rysunek 8.5.2. Zmiana masy badanego uszczelniaacza wału korbowego



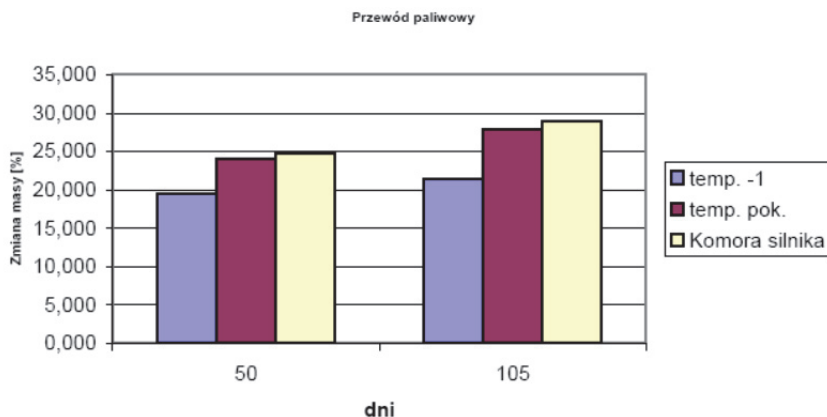
Rysunek 8.5.3. Zmiana wytrzymałości na rozciąganie próbki pobranej z misy olejowej



Rysunek 8.5.4. Zmiana masy próbki pobranej z uszczelki misy olejowej



Rysunek 8.5.5. Zmiana wytrzymałości na rozciąganie próbki pobranej z przewodu paliwowego silnika



Rysunek 8.5.6. Zmiana masy próbki pobranej z przewodu paliwowego silnika

Pomiary wykonano z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej MTS Insight2 uzyskując zapis spadku wytrzymałości na rozciąganie próbek średnio o 15% po 105 dniach cyklu pomiarowego na tle zmiany kwasowości oleju. Zaobserwowano równoczesny wzrost masy próbek poddanych działaniu biopaliwa jako wynik destrukcji elastomeru.

8.6. Proces destrukcji materiałów konstrukcyjnych silnika

Proces destrukcji materiałów konstrukcyjnych, z których wykonane są elementy aparatury paliwowej i układu paliwowego silnika ciągnika rolniczego, został oceniony metodą spektrometryczną biorąc za podstawę zawartość metalu w paliwie estrowym przy zachowaniu zgodności metodyki z EN ISO 3696 i równoczesnej kontroli liczby kwasowej paliwa wg PN-EN 14104. Przyjęto odwzorowanie warunków termicznych kontaktu paliwa z 15 elementami aparatury paliwowej silnika ciągnika rolniczego w cyklach kontrolnych składających się na czas jednego roku eksploatacji. Uzyskano skalę destrukcji materiałów w grupie czterech metali konstrukcyjnych jako wskaźnik ($\text{mg}_{\text{metal}}/\text{kg}_{\text{paliwa RME}}$) na tle zmiany liczby kwasowej estru. Wyznaczano każdorazowo powierzchnię kontaktu badanej próbki z biopaliwem, gdyż wartością stałą w procesie oceny był stosunek powierzchni czynnej próbki do objętości biopaliwa. Wykazano nasilenie procesu destrukcji dla stali stopowej jako materiału sekcji tłoczącej pompy wtryskowej, a także dla przewodów paliwowych wysokiego ciśnienia. Wysoki wskaźnik destrukcji dotyczy miedzianych uszczelnaczy w pompie wtryskowej oraz powłoki cynowej zbiornika paliwa.

Procedura pomiarowa

Próbki materiałowe zmineralizowano, a następnie poddano badaniu spektrometrycznemu na zawartość metali: żelaza, miedzi, cynku i glinu. Odczynniki stosowane w badaniu wykazywały stopień czystości 3 wg EN ISO 3696 tj.: kwas azotowy HNO_3 (65%), woda

utleniona perhydrol H_2O_2 (30%), woda destylowana. Oznaczenie zawartości metali wykonywane było za pomocą spektrometru absorpcji atomowej z induktywnie wzbogaconą plazmą JCP-AES Jobin Von238. Obraz destrukcji metali oceniany był również w odniesieniu do stanu wyjściowego próbek dokonując zapisu obrazów (rys. 8.6.1.-8.6.3.). W przedziałach czasu pomiarów testowych wykonywano pomiary liczby kwasowej paliw poddanych kontaktowi z badanymi próbkami. Zarejestrowane wyniki po 105 dniach kontaktu badanych próbek z biopaliwem w różnych warunkach temperatur zamieszczono na rys. 8.6.4.



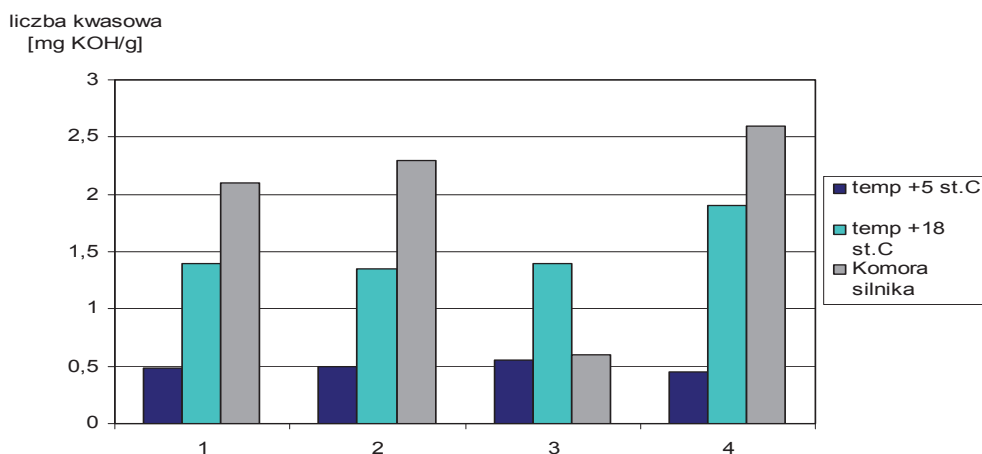
Rysunek 8.6.1. Fotograficzny obraz uszczelki miedzianej przewodu zasilającego pompę wtryskową (od lewej): – poddaną działaniu testu biopaliwa, – podkładka w stanie wyjściowym, – podkładka poddana działania ON w warunkach testowych



Rysunek 8.6.2. Fotograficzny obraz obudowy pompy wtryskowej (stop AK7) – (od lewej): test w kontakcie z biopaliwem, – test w kontakcie z ON, – stan wyjściowy próbki



Rysunek 8.6.3. Fotograficzny obraz tłoczka sekcji tłoczącej pompy wtryskowej (od lewej): – stan wyjściowy, – test w kontakcie z ON, – test w kontakcie z biopaliwem



Rysunek 8.6.4. Graficzne przedstawienie zmiany kwasowości w funkcji czasu (105 dni) i temperatury dla biopaliw w kontakcie z tłoczkiem sekcji tłoczącej pompy wtryskowej:

1 – uszczelka miedziana, 2 – przewód wysokiego ciśnienia, 3 – sekcja tłocząca, 4 – wycinek zbiornika paliwa

Przeprowadzone badania wskazały skalę destrukcji materiałów z których wykonane są elementy silnika narażone na kontakt z biopaliwem:

- wał rozrządu 4,17 ($\text{mg Fe}^{2+} \cdot \text{kg}^{-1}$ paliwa),
- przewód wysokiego ciśnienia 7,33 ($\text{mg Fe}^{3+} \cdot \text{kg}^{-1}$ paliwa),
- rozdzielacz sekcji tłoczącej 6,31 ($\text{mg Fe}^{2+} \cdot \text{kg}^{-1}$ paliwa),

- sprężyna sekcji tłoczącej 3,42 (mg $\text{Fe}^{2+} \cdot \text{kg}^{-1}$ paliwa),
- uszczelniacz miedziany 9,52 (mg $\text{Cu}^{2+} \cdot \text{kg}^{-1}$ paliwa),
- korpus pompy wtryskowej 8,56 (mg $\text{Al}^{3+} \cdot \text{kg}^{-1}$ paliwa),
- sekcja tłocząca 4,31 (mg $\text{Fe}^{2+} \cdot \text{kg}^{-1}$ paliwa),
- zawór odciażający (zwrotny) 3,91 (mg $\text{Fe}^{2+} \cdot \text{kg}^{-1}$ paliwa).

Przeprowadzone badania wykazały znaczną zmianę liczby kwasowej paliwa po okresie 105 dnia kontaktu z próbkami. Największe zmiany dotyczą elementów wykonanych ze stopów aluminium, w których wartość liczby kwasowej przekroczyła czterokrotnie normę. Wyniki te skłaniają do zastanowienia się nad weryfikacją doboru materiałów konstrukcyjnych układu paliwowego i korbowo-tłokowego silników eksploatowanych na paliwach estrowych.

Cechy fizyko-chemiczne i użytkowe RME są wynikiem jakości stosowanego surowca – oleju rzepakowego, jego wstępnej rafinacji, procesu estryfikacji, a także sposobu oczyszczenia produktu finalnego. Produkcja i stosowanie RME wymaga bieżącej kontroli procesu estryfikacji, gdyż podstawowym warunkiem wysokiej jakości RME jako paliwa silnikowego, jest możliwie wysoki poziom estryfikacji bez pozostawienia cząsteczek oleju rzepakowego. Estry nie powinny zawierać resztek alkoholu metylowego zwiększającego niebezpieczeństwo zatarcia sekcji tłoczących pompy wtryskowej. Odmierna budowa chemiczna RME oraz inny skład frakcyjny stanowią podstawowe różnice pomiędzy tym produktem a ON. Ponadto różnice dotyczą lepkości, masy molowej, zawartości siarki, wartości opałowej, temperatury zapłonu i zawartości tlenu. Różnice te mają zasadniczy wpływ na zachowanie się RME zarówno w komorze spalania silnika, jak i warunkach magazynowania.

Przeprowadzone badania wykazały, iż:

- Ocena jakości produktów RME powinna być dokonywana w trzech współzależnych aspektach poznawczych:
 - rozpoznania cech fizyko-chemicznych stosowanego RME,
 - kształtowania procesu wtrysku i spalania paliwa w przyjętym typoszeregu konstrukcyjnym silnika,
 - procesu destrukcji materiałów konstrukcyjnych i oleju smarującego silnik.
- Ze względu na postępujące efekty starzeniowe RME bez stosowania uszlachetniaczy w warunkach agrorafinerii bazującej na technologii niskotemperaturowej, uzyskane produkty należy przeznaczyć do bieżącego wykorzystania eliminując proces długotrwałego magazynowania.
- Konieczne jest wprowadzenie zamienników materiałowych w układzie paliwowym silnika zgodnie ze standaryzacją przemysłu motoryzacyjnego: zbiornika paliwa – Polietylen TL669, przewody paliwa – Poliamid PA12, uszczelniacze – PTFE (politetrafluoroetylen).

9. LITERATURA

- Adamowicz, M. (2005). Zrównoważony i wielofunkcyjny rozwój rolnictwa a agronomia. *Annales UMCS, Sec. E*, 60, 71-91.
- Baum, R.; Wajszczyk, K.; Wawrzynowicz, J. (2012). Modelowe rozwiązanie logistyczne dla lokalnego rynku biomasy. *Logistyka*, 4, 846-856.
- Baxter, L. (2005). Biomass-coal co-combustion: opportunity for affordable renewable energy, *Fuel* 84, 1295-1302.
- Benetto, E.; Rousseaux, P.; Blondin, J. (2004). Life cycle assessment of coal by-products based electric power production scenarios, *Fuel* 83, 957-970.
- Beurskens, L.W.M.; Hekkenberg, M. *Renewable Energy Projections*. European Environment Agency, Energy Research Center of the Netherlands 2011
- Biernat, K.; Kulczycki, A. (2006). *Prognoza rozwoju biopaliw w Polsce, materiały z konferencji Rynek biopaliw w Polsce – szanse i zagrożenia*, Warszawa.
- Biernat, K.; Kulczycki, A.; Rogulska, M. (2007). *Development of Alternative Fuels in Poland*. Expert Workshop on Biofuels Support in Baltic States, Nordic Countries and Poland, Tallin.
- Biernat, K. (2005). Prognoza rozwoju paliw. „*Studia Ecologiae et Bioethicae*”, 3.
- Biomax.com.pl, http://biomax.com.pl/galeria_slazowiec_pensylwanski.php
- Bitra, V.S.; Womac, A.R.; Chevanan, N.; Sokhansanj, S. (2008). *Comminution properties of biomass in hammer mill and its particle size characterization*. Published by the American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan. Pozyskano z: <http://www.biomassprocessing.org/publicationspage.htm>, 28.
- Bocheński, C. I. (2003). *Biodiesel paliwo rolnicze*. WSGGW Warszawa
- Borkowska, H.; Styk, B. (2006). *Ślazowiec pensylwański. Uprawa i wykorzystanie*. Wydanie II poprawione i uzupełnione. Wyd. AR Lublin. ISBN 83-7259-142-3.
- Borkowska, H.; Styk, B. (1997). *Ślazowiec pensylwański (Sida hermaphrodita Rusby) uprawa i wykorzystanie*. Wyd. AR Lublin, 51.
- BOT GiE S.A. Referat wygłoszony na konferencji pt. *Biomasa dla elektroenergetyki i ciepłownictwa. Szanse i problemy*. SGGW Warszawa 27-28 luty 2007 r. (CD konferencji).
- Boyce, M.P. (1991). *Gas Turbine Engineering Handbook. Design, Operation, Maintenance*. Gulf Publishing Company, Houston, 47-56.
- Boyd, J.; Christersson, L.; Dinkelback, L. (2000). *Energy from willows*. SAC. Pozyskano z: http://www1.sac.ac.uk/envsci/external/willowpower/willow_s.pdf, 36.
- Braun, R. (1982). *Biogas – Methangärung organischer Abfallstoffe*. Springer Verlag Wien, New York, 85-99.
- Brown, A.E.; van den Heuvel, E.J. (1996). *Producer gas quality requirements for IGCC gas turbine use: a state of the art review*. EC-Project EC/AIR: Air-CT-92-0294, MHP, PO Box 217; 3950 AC. Maarn, The Netherlands, 230-278.
- Bruglieri, M.; Liberti, L. (2008). Optimal running and planning of a biomass-based energy production process. *Energy Policy*, 36, 2430-2438.
- Brzeżański, M. (2007). Carbon Dioxide Emissions in the Aspect of Applied Engine Fuels. *Combustion Engines*, 4(131), 62-68.
- Brzeżański, M.; Śliwiński, K. (2004). Downsizing – a New Direction of Automobile Engine Development, *Combustion Engines*, 2(119), 3-11.
- Cedrus.org.pl, <http://cedrus.org.pl/biomasa3.php>
- Ceulemans, R.; Deraedt, W. (1999). Production physiology and growth potential of poplars under short-rotation forestry culture. *Forest Ecology and Management*, 121, 9-23.
- Christine, I.; Volkhard, S.; Werner, D.; Johannes, E. (2004). Quality changes of chipped short rotation coppice during storage with special emphasis on human pathogen fungi. Proceedings of the 9th

- International Conference Ecological Energy Resources in Agriculture. Institute of Agricultural Engineering LUA, 117-123.
- Cieślakowski, B.; Ślipek, Z. (2006). Zmienność cech oleju rzepakowego w warunkach przechowywania. *Inżynieria Rolnicza*, 13(88), 61-68.
- Cisek, J.; Mruk, A.; Hlavňa, V. (2011). The Properties of a HDV Diesel Engine Fueled by Crude Rapeseed Oil, *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, Vol. XI, 29-39.
- Cisek, J. (1998). Wpływ oleju rzepakowego i jego mieszanin z olejem napędowym na własności silnika wysokoprężnego, rozprawa doktorska, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, Politechnika Krakowska, Kraków.
- Claas.dbv.pl, http://www.claas.dbv.pl/viewpage.php?page_id=5
- Cocker-Maciejewska, A. (2007). Obróbka wstępna biomasy na potrzeby systemów energetycznych. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 30, 133-141
- Conferențe Ecological Energy Resources in Agriculture (2004). Institute of Agricultural Engineering LUA, 117-123.
- Dal-Mas, M.; Giarola, S.; Zamboni, A.; Bezzo, F., (2011). Strategic design and investment capacity planning of the ethanol supply chain under price uncertainty. *Biomass Bioenergy*, 35, 2059-2071.
- Dowkonnt, J. (1973). Teoria silników cieplnych. Warszawa.
- Dreszer, K.; Michałek, R.; Roszkowski, A. (2003). *Energia odnawialna – możliwości jej pozyskiwania i wykorzystania w rolnictwie*. Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków.
- Dubas, J. W.; Grzybek, A.; Kotowski, W.; Tomczyk, A., (2004). *Wierzba energetyczna – uprawa i technologie przetwarzania*. Wyższa Szkoła Ekonomii i Administracji w Bytomiu. ISBN 83-88587-71-4v
- Dubas, J.W. (2003). *Materiały pokonferencyjne I Konferencji „Odnawialne źródła energii w powiecie dzierzoniowskim”*, Bielawa.
- Dubas, J.W. (2005). *VIII Międzynarodowe Targi Energetyki*, Salon Biomasy. Kielce.
- Duda-Kętuś, A. (2011). *Uwarunkowania logistyczne wykorzystania biopaliw stałych do produkcji energii elektrycznej w elektrowniach zawodowych*. Praca doktorska. Maszynopis. AGH Kraków.
- Dunnett, A.; Adjiman, C.S.; Shah, N.A., (2008). Spatially explicit whole system model of the lignocellulosic bioethanol supply chain: an assessment of decentralized processing potential. *Biotechnol. Biofuels*, 1, 13.
- EN 14214:2003 Automotive fuels – Fatty Acid – Requirements and test methods.
- Faber, A. (2010). Dobór roślin energetycznych dostosowanych do uprawy w wybranych rejonach kraju [w:] Bocian P., Golec T., Rakowski J. (red.) *Nowoczesne technologie pozyskiwania i energetycznego wykorzystania biomasy*, Wyd. Instytut Energetyki. Warszawa.
- Faber, A. (2010). *Okresowa indeksacja cen skupu biomasy niezbędnym czynnikiem budującym podaż biomasy stałej dla energetyki*. Źródło: cire.pl, 2010. Dostęp – maj 2014
- Faber, A.; Kuś, J. (2007). *Rośliny energetyczne dla różnych siedlisk*. Wyd. Wieś Jutra. Warszawa, 11-12.
- Faber, A.; Kuś, J.; Matyka, M. (2009). *Uprawa roślin na cele energetyczne*. Poradnik. Wyd. W i B Wiesław Drzewiecki. Warszawa.
- Faber, A.; Pudelko, R.; Borzęcka-Walker, M. (2008). *Zasoby biomasy oraz założenia jej logistyki dla Elektrowni Dolna Odra. Zastosowanie systemu informacji geograficznej do określenia zasobów biomasy oraz założeń logistyki dla elektrowni Dolna Odra*, <http://ogrzewnictwo.pl/smietnik/zasoby-biomasy-oraz-zalozenia-jej-logistyki-dla-elektrowni-dolna-odra>
- Fara, L.; Filat, M.; Chira, D.; Fara, S.; Nutescu, C. (2009). *Preliminary research on short cycle poplar clones for bioenergy production*. [on-line] Proceedings of RIO9 – World Climate and Energy Event, 17-19 marca 2009, Rio de Janeiro, Brazylia. http://www.rio9.com/programme/Book_of_Proceedings/21_BM_Fara_2.pdf
- Forest Research – Technical Development (1998). Harvesting and comminution of short rotation coppice. *Technical Note* 8, Crown Copyright 1998 500S/20/93
- Frączek, J.; Mudryk, K. (2009). Wpływ wilgotności rozdrabnianych pędów wierzby *Salix viminalis* L. na skład granulometryczny uzyskiwanych zrębków. *Acta Agrophysica*, 14(1).

- Frączek, J.; Francik, S.; Ślipek, Z. (2012). Uwarunkowania spalania i współspalania biomasy. *Autobusy. Technika. Eksploatacja. Systemy Transportowe*, 10. Lublin.
- Frączek, J., Hebda, T., Łapczyńska-Kordon, B. (2012). *Ocena możliwości wykorzystania odpadów pochodzenia rolniczego*. Prace naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu.
- Frączek, J.; Mudryk, K. (2005). Jakości sadzonek wierzyby energetycznej w aspekcie sadzenia mechanicznego. *Inżynieria Rolnicza*, 6(66), 159-167.
- Frączek, J.; Mudryk, K., Wróbel, M. (2009). Klon jesionolistny *Acer negundo* L. – nowy potencjalny gatunek energetyczny. *Acta Agrophysica*, 14(2), 313-322.
- Frączek, J.; Mudryk, K. (2008). Zmiany wilgotności pędów wierzyby *Salix riminalis* L. w okresie sezonowania. *Inżynieria Rolnicza*, 10(108), 55-61.
- Frączek, J.; Juliszewski, T.; Mudryk, K. (2006). Pomiar wilgotności pędów i zrębków wierzyby energetycznej. *Inżynieria Rolnicza*, 12(87), 137-144.
- Gera, D.; Mathur, M.P.; Freeman, M.C.; Robinson, A. (2002). Effect of large aspect ratio of biomass particles on carbon burnout in a utility boiler. *Energy&Fuels*, 16, 1523-1532.
- Gigler, J.K.; Loon, W.K.P. van. Yissers, M.M. Bot G.P.A. (2000). Forced conveerire drying of willow chips. *Biomass and Bioenergy* 4(19), 259-270.
- Gigler, J.K.; Loon, W.K.P. van, Somievel, C. (2004). Experimenti and model/ing of param eters influencing natura] wind drying of wittow chtmks. *Biomass Bioenergy*. 7(26), 507-514.
- Głodek, E.; Kalinowski, W.; Janecka, L.; Werszler, A.; Garus, T.; Kościanowski, J. (2007). *Pozyskiwanie i energetyczne wykorzystanie biogazu rolniczego*. Instytut Mineralnych Materiałów Budowlanych. Opole, 65-75
- Gostomczyk, W. (2012). Organizacja systemu logistycznego w produkcji i wykorzystaniu biomasy energetycznej. *Logistyka*, 4, 939-946.
- Góral, S. (1999). *Słonecznik bulwiasty – topinambur, uprawa i użytkowanie*. IHAR, Radzików.
- Gradziuk, P. (2012). *Perspektywy wykorzystania biomasy na cele energetyczne w Polsce ze szczególnym uwzględnieniem słomy*. Polagra 2012. (www.czystaenergia.pl/pdf/polagra2012/3.ppt).
- Gradziuk, P.; Grzybek, A.; Kowalczyk, K.; Kościak, B. (2003). *Biopaliwa*. Wyd. „Więś Jutra” Sp. z o.o. Warszawa. ISBN 83-88368-10-9.
- Gradziuk, P. (2008). *Charakterystyka biomasy użytkowej/handlowej dostarczanej na potrzeby planowanej przez Yattenfall Heat Poland elektrodepawni Nowy Pruszków w Pruszkowie*, maszynopis.
- Gradziuk, P.; Kościak, K. (2007). *Analiza możliwości i kosztów pozyskania biomasy na cele energetyczne na potrzeby energetycznego wykorzystania w Gminie Cmolas*. Maszynopis.
- Gro, V.; Culshaw, D. (2001). *How is life if you try to live from developing SRC in Denmark?* Experiences, results and recommendations. http://www.shortrotationcrops.org/PDFs/IEA_DevelopingSRC.pdf.
- Grzybek, (red.) (2009). *Rośliny energetyczne*. [w:] *Odnawialne źródła energii i działania adaptacyjne do zmiany klimatu w rolnictwie i na wsi – przykłady doświadczeń w UE*. Wyd. Naukowe Scholar. Warszawa. ISBN 978-83-7383-392-0.
- Grzybek, A.; Muzalewski, A. (2010). *Nowoczesne technologie pozyskiwania i energetycznego wykorzystywania biomasy*. Inst. Energetyki, Warszawa.
- Grzybek, A. (2006). Wykorzystanie biomasy w energetyce systemowej. *Więś Jutra*, 8/9, 5-7.
- Grzybek, A. (2007). *Logistyka zaopatrzenia w biomasę średnich i dużych obiektów energetycznych*. [w:] *Biomasa dla elektroenergetyki i ciepłownictwa. Szanse i problemy*. Wyd. „Więś Jutra” Warszawa.
- Harders, G. (2002). *Harvest, loading and transporting of willow chips from agricultural land – a system analysis*. JTI Institut för Jordbruks – och miljö teknik. Raport JTI. Pozyskano z: https://www.etde.org/etdeweb/details_open.jsp?osti_id=20240750, 294.
- Heidrich, Zb.; Nieścier, A. (1999). *Stabilizacja beztlenowa osadów ściekowych*. Wyd. Instalator Polski, Warszawa
- Jakóbiec, J. (2005b). *Raport z badań laboratoryjnych paliw silnikowych rzepakowych*. Nr 71/BE/05/ITN/2005.

- Jankowska-Huflejt, H. (2013). *Zmiany w gospodarowaniu na TUZ w Europie i w Polsce*. Konferencja naukowa „Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie”, Falenty 22-28 listopada 2013.
- Janowska, G. (1998). Stabilność termiczna i palność elastomerów. Wyd. Politechniki Łódzkiej.
- Jęczmionek, Ł. (2012). *Zagadnienia hydrokonwersji olejów roślinnych i tłuszczów zwierzęcych do węglowodorowych bio-komponentów parafinowych (HVO)*. Instytut Nafty i Gazu, Kraków.
- Jędrzak, A. (2007). *Biologiczne przetwarzanie odpadów*. PWN Wyd. Nauk. Warszawa, 230-260.
- Jędrzak, A.; Haziak, K. (2001), *Przegląd Komunalny. Dodatek: Mechaniczno-biologiczne unieszkodliwianie odpadów*, 5(116), 104-105.
- Jirjis, R. (2005). Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted *Salix viminalis*. *Biomass Bioenergy*, Vol. 28, nr 2, 193-201.
- Juliszewski, T. (2009). *Ogrzewanie biomasą*. PWRiL. Poznań.
- Juliszewski, T.; Kwaśniewski, D.; Kuboń, M. (2004). Symulacja kosztów transportu tradycyjnych nośników energii i biomasy do celów grzewczych. *Inżynieria Rolnicza*, 3(58). Kraków.
- Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (2001). *Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 270-290.
- Kampman, B.E.; den Boer, L.C.; Croezen, H.J. (2005). *Biofuels Under Development*. Netherlands Petroleum Industry Association, Delft.
- Karačić, A.; Verwijst, T.; Weih, M. (2003). Above-ground woody biomass production of short-rotation *Populus* plantations on agricultural land in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 18, 427-437.
- Karki, J. et al (2005). *The performance and operation economics of co-fired biomass boilers*. Bioenergy in Wood Industry 2005 – Book of Proceedings, 373-380, ISBN 952-5135-31-4.
- KOM (2011) 112, Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, *Plan działania prowadzący do przejścia na konkurencyjną gospodarkę niskoemisyjną do 2050r.*, Bruksela 2011.
- Kopp, R.F.; Abrahamson, L.P.; White, E.H.; Volk, T.A.; Nowak, C.A.; Filhart, R.C., (2001). Willow biomass production during ten successive annual harvests. *Biomass Bioenergy*, Vol. 20, nr 1, 1-7.
- Kościk, B. (red.), Borkowska, H.; Dubas, J. W.; Gradziuk, P.; Kowalczyk-Juśko, A.; Martyn, W.; Rawicki, B.; Styk, B.; Węgorzek, T. (2003). *Rośliny energetyczne*. Wyd. AR Lublin. ISBN 83-7259-091-5.
- Kowalczyk-Juśko, A. (2013). Biometryczne i energetyczne parametry spartiny preriowej (*Spartina pectinata* Link.) w trzech pierwszych latach wegetacji. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, Z. 2(80), Warszawa.
- Krawiec, F. (2010). *Odnawialne źródła energii w świetle globalnego kryzysu energetycznego*. Copyright by Difin SA. Warszawa, ISBN 978-83-7641-241-2.
- Kuboń, M. (2001). *Aktualny stan i możliwości rozwoju usług transportowych na terenach wiejskich*. Praca doktorska. Maszynopis. Kraków.
- Kuboń, M. (2008). Koszty infrastruktury logistycznej w przedsiębiorstwach rolniczych. *Inżynieria Rolnicza*, 10(108). Kraków.
- Kuboń, M. (2010). *Transport i logistyka dostaw biomasy*. [w]. Produkcja biomasy na cele energetyczne, PTIR Kraków, 167-197.
- Kuboń, M. (2011). Zapasy w przedsiębiorstwie rolnym – konieczność czy zapobiegliwość? *Logistyka*, 3, 58-61.
- Kwaśniewski, D.; Mudryk, K.; Wróbel, M. (2008). Ocena zbioru wierzby energetycznej z użyciem kosi spalinowej. *Inżynieria Rolnicza*, 10(108), 159-165.
- Kwaśniewski, D.; Mudryk, K.; Wróbel, M. (2006). Zbiór wierzby energetycznej przy użyciu piły łańcuchowej. *Inżynieria Rolnicza*, 13(88), 271-278.
- Ledakowicz, S., Krzyste, L. (2005). *Wykorzystanie fermentacji metanowej w utylizacji odpadów przemysłu rolno-spożywczego*, Biotechnologia 3 (70), 165-183.
- Lewandowski, W. (2006). *Proekologiczne odnawialne źródła energii*. WNT Warszawa, 98-107.

- Lisowski, A. (2006). Ścinanie i rozdrabnianie wierzby energetycznej. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*, 4, 8-11.
- Lisowski, A. (2010). *Technologie zbioru roślin energetycznych*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 77-79.
- Lotko, W. Longwic, R. (1999). *Nieustalone stany pracy silnika zasilanego paliwem rzepakowym*. Radom.
- Majtkowska, G.; Majtkowski, W. (2005). *Trawy i rośliny motylkowate*. Agro Serwis.
- Majtkowski, W. (2007). *Rośliny energetyczne na paliwo stałe*. Wyd. Wieś Jutra. Warszawa, 16-18.
- Maniatis, K. (2007). *Biofuels EU Policy and Recent Development*. Materiały z II spotkania „Mirror Group ETPB”, Bruksela 2007.
- Matyka, M.; Kuś, J. (2011). Plonowanie i cechy biometryczne wybranych genotypów miskant. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, Nr 2. Warszawa.
- Merkisz, J. (1994). *Ekologiczne aspekty stosowania silników spalinowych*. Poznań.
- Michalek, R.; Kuboń, M. (2009). Poziom infrastruktury logistycznej a wyniki produkcyjne w wybranych gospodarstwach Polski południowej. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 2, 33-38.
- Mikkonen, S. et. al., (2012). *HVO, Hydrotreated Vegetable Oil – a Premium Renewable Biofuel for Diesel Engines*. Publikacja własna Neste Oil, czerwiec 2012.
- Mikkonen, S. (2011). Vegetables are Good for You, *SAE Off-Highway Engineering*, 34.
- Ministerstwo Gospodarki (2010). *National Renewable Energy Action Plans*, <http://www.mg.gov.pl>
- Ministerstwo Gospodarki (2010). *Polityka energetyczna Polski do 2030r*. Warszawa.
- Ministerstwo Środowiska Departament Gospodarki Odpadami. *Wytyczne dotyczące wymagań dla procesów kompostowania, fermentacji i mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów* (według stanu prawnego na dzień 15 grudnia 2008 r.) Warszawa, grudzień 2008r.
- Miskantolbrzymi.net-sadzenie, <http://miskantolbrzymi.net/index.php?name=sadzenie>
- Miskantolbrzymi.net-zbiór, <http://miskantolbrzymi.net/index.php?name=zbiór>
- Morawski, A. (2013). Ramy prawne projektów związanych z odnawialnymi źródłami energii w Polsce. Pozyskano z http://www.paiz.gov.pl/prawo/odnawialne_zrodla_energii.
- Mudryk, K. (2007). *Wybrane właściwości fizyczne pędów i zrębków wierzby energetycznej*. Praca doktorska, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, UR w Krakowie.
- Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. *Program Prosument*. Pozyskano z: <http://biogazownierolnicze.pl/aktualnosci/1926/narodowy-fundusz-ochrony-srodowiska-i-gospodarki-wodnej-uruchomil-program-prosument>.
- Nimmrichter, R.; Kuebler, H. (1999). *Biogas yield of thermophilic and mesophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste*. Barcelona 15-18 June, 369-374
- Nowak, J. (2010). Maszyny do formowania bel cylindrycznych z materiałów rozdrobnionych i sypkich. *Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna*. 3, Poznań.
- Orkel.no, <http://orkel.no/products/compactors-en-GB/compactors/>
- Panichelli, L.; Gnansounou, E. (2008). GIS-based approach for defining bioenergy facilities location: A case study in Northern Spain based on marginal delivery costs and resources competition between facilities. *Biomass and Bioenergy*, 32, 289-300.
- Parker, N.; Fan, Y.; Ogden, J. (2009). *From waste to hydrogen: an optimal design of energy production and distribution network*. Transport Res., <http://www.metrans.org/nuf/2007/documents/Parker.pdf>
- Pasyniuk, P. (2008). *Prawne, technologiczne, środowiskowe i ekonomiczne uwarunkowania rozwoju produkcji odnawialnych źródeł energii opartych na biomasie pochodzenia rolniczego*. Ekspertyza przygotowana na zlecenie Ministerstwa Rolnictwa i Rozwoju Wsi. Warszawa, listopad, 2008
- Pellerin, R.A.; Aneshansley, D.J.; Phelps, A.; Abrahamson, L.P. (1999). *Evaluation of tree harvesters and delivery systems for short rotation willow crop*. ASAE/CSAE-SCGR, Paper 995055. Pozyskano z: www.cabdirect.org/abstracts/19990612242.html.
- Piotrowski, K.; Wiltowski, T.; Mondal, M. (2004). Transport biomasy. *Czysta Energia*, 10, Warszawa.

- Płotkowski, L. (2007). *Bilans biomasy z lasów, stan obecny i prognoza średnio- i długookresowa*. [w]. Biomasa dla elektroenergetyki i ciepłownictwa. Szanse i problemy. Wyd. „Wies Jutra” Warszawa.
- PN-EN 14104 *Estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME) Oznaczenie liczby kwasowej*.
- PN-EN 14213 *Estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME). Wymagania i metody badań*.
- PN-ISO 1817:2001 *Guma. Oznaczenie odporności na działanie cieczy*.
- PN-ISO 37:1998 *Oznaczenie właściwości wytrzymałościowych przy rozciąganiu*.
- Postrzednik, S., (2010). Biomasa - jej znaczenie oraz aspekty wykorzystania. *Energetyka*, 12, 840.
- Prankl, H.; Schindlbauer, H. (1999). Oxidation Stability of FAME; Proceedings of the International Conference “Biomass for Energy and Industry” Würzburg, Germany.
- Pudółko, R.; Faber, A. (2010). *Dobór roślin energetycznych dostosowanych do uprawy w wybranych rejonach kraju. Nowoczesne technologie pozyskiwania i energetycznego wykorzystania biomasy, Instytut Energetyki, Warszawa*, 50-68.
- Rce.oodr.pl, http://rce.oodr.pl/pokaz.php?dzial=wystawa_oze_dla_domu_i_biznesu&kategoria=kolekcja_roslin_energetycznych&pkt=spartina_pieriowa&id=120215:091727&on=tak.
- Rentizelas, A.A.; Tolis, A.; Tatsiopoulos, I.P. (2009). Logistics issues of biomass: the storage problem and the multi-biomass supply chain. *Renew. Sustain. Energ. Rev.*, 12, 887-894.
- Rickets, B. (2002). *Technology Status Review of waste/Biomass Co-Gasification with Coal*, Ichem Fifth European Gasification Conference, 8-10 April 2002, Noordwijk, The Netherlands.
- Rogulska, M., Gumeniuk, A., (2006). Biopaliwa – dylematy surowcowe. *Przemysł chemiczny*, 85/12, 1612-1615.
- Rogulska, M.; Grzybek, A.; Szlachta, J.; Tys, J.; Krasuska, E.; Biernat, K.; Bajdor, K. (2011). Powiązanie rolnictwa i energetyki w kontekście realizacji celów gospodarki niskoemisyjnej w Polsce. *Polish Journal of Agronomy*, 7, 92-101.
- Rosenquist, H., Dawson, M. (2005). Economics of willow growing in Northern Ireland. *Biomass Bioenergy*, Vol. 28 nr 1, 7-14.
- Schulz, H.; Eder, B. (2001). *Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiel, überarbeitete Auflage, Ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg*, 25-45.
- Sikora, J. (2012). Badanie efektywności produkcji biogazu z frakcji organicznej odpadów komunalnych zmieszanej z biomasą pochodzenia rolniczego. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 02(4 (Dec 2012)), 89-98.
- Sikora, J.; Wolny-Koładka, K.; Malinowski, M. (2013). Biodiversity of microorganisms isolated from selected substrates used in agricultural biogas plants versus the quantity and quality of obtained biogas. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 04 (2 (Dec 2013)), 141-154.
- Skodras, G.; Grammelis, P.; Kakaras, E.; Sakellariopoulos, G.P. (2004). Evaluation of the environmental impact of waste wood co-utilization for energy production, *Energy* 29
- Sobek, M. http://i1.ytimg.com/vi/n_IrFLSsUQA/maxresdefault.jpg
- Sokhansanj, S.; Kumar, A., Turhollow, A.F. (2006). Development and implementation of integrated biomass supply analysis and logistics model (IBSAL). *Biomass Bioenergy*, 30, 838-847.
- SRC SERVICES - Nordic Biomass - APRIL 2010 www.nordicbiomass.dk/files/SRC%20Services%20and%20equipment%202010.pdf
- Sroc.cfans.umn.edu. http://sroc.cfans.umn.edu/prod/groups/cfans/@pub/@cfans/@sroc/@research/documents/article/cfans_article_143754.jpg
- Stolarski, M.; Szczukowski, S., Tworowski, J. (2007). Charakterystyka wybranych biopaliw z biomasy stałej. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 4, 21-26.
- Styles, D.; Thorne, F.; Jones, M.B. (2008). Energy crops in Ireland: An economic comparison of willow and Miscanthus production with conventional farming systems. *Biomass and Bioenergy*, 32(5), 407-421.
- Sylvain, L.; Dagmar, S.; Erik, D.; Erwin, S.; Michael, O. (2008). Optimal location of wood gasification plants for methanol production with heat recovery. *Int. J. Energ. Res.*, 32, 1080.

- Szczukowski, S.; Tworkowski, J.; Wiwart, M.; Przyborowski, J. (2002). *Wiklina (Salix Sp.). Uprawa i możliwości wykorzystania*. Wyd. Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego. Olsztyn.
- Szczygieł, K. (2006). Mikrovegetatywne rozmnażanie szansą dla plantacyjnej uprawy drzew szybko rosnących. *Postępy Techniki w Leśnictwie*, 97, 18-22.
- Szeptycki, A.; Wójcicki, Z. (2003). Postęp technologiczny i nakłady energetyczne w rolnictwie do 2020 r. Wyd. PTIR Kraków, 1-96.
- Szlachta, Z.; Cisel, J.; Weisło, G. (2000). *Reducing the Content of Nitrogen Oxides in Diesel Engine Exhaust Gas*. KOKA 2000. XXXI. Konferencja kateder a pracovisk spalovacich motorov českých a slovenských vysokých škôl. Žilina, 41-48.
- Szlachta, Z. (2002). *Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami rzepakowymi*. Warszawa.
- Szyber, J. (2005a). Wpływ właściwości zrębków drzewnych na ich transport i przechowywanie. *Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna*, 4. Warszawa.
- Szyber, J. (2005b). Przechowywanie zrębków drzewnych w stosach. *Czysta Energia*, 41. Warszawa.
- Terlikowski, J. (2012). Biomasa z trwałych użytków zielonych jako źródło energii odnawialnej. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, Z.1(75). Warszawa.
- Terlikowski, J.; Rychter, A.; Staszun, M. (2005). *Calorific value of the biomass from meadow situated in Żuławy region (Vistula delta, Poland)*. [Poster na: 12. Symposium REGWA „Nutzung regenerativer Energiequellen und Wasserstofftechnik”]. [3–5.11.2005 Fachhochschule Stralsund].
- Tymiński, J. (1997). *Wykorzystanie odnawianych źródeł energii w Polsce do roku 2030*. IBMER. Warszawa. Maszynopis.
- Ustawa prawo energetyczne z dnia 10 kwietnia 1997r. (Dz.U. Nr 54, poz. 348 z późn.zm.).
- Volk, T. A.; Abrahamson, L.P.; Priepke, E.; Aneshansley, D.; White, E.H.; Smart, L.B. (2008). Development of a Willow Biomass Crop Harvester Based on a New Holland Forage Harvester and Specially Designed Willow Cutting Head. *Society of American Foresters Agroforestry Working Group Newsletter Volume 5: Issue 1*.
- Weisło, G. (2013). *Analiza wpływu odmian rzepaku na własności biopaliw RME oraz parametry pracy silnika o zapłonie samoczynnym*. Monografia habilitacyjna. Wydawnictwo FALL, Kraków.
- Weisło, G., (2005). *Determining Energy Value of Biodiesel FAME*. Materiały z konferencji PTNSS KONGRES – 2005, “Combustion Engines”, 93.
- Weisło G., *Determining Rheological Properties of CSME Biodiesel Type Biofuels*, „Combustion Engines“, Vol. 2009-SC1, 2009, s. 20–25.
- Weiland, P. (2001). Grundlagen der Methangärung – Biologie und Substrate; VDI Berichte, Nr. 1620 „Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven”; 19-32; VDI-Verlag,
- Weiland, P.; Rieger, Ch. (2001). *Wissenschaftliches Messprogramm zur Bewertung von Biogasanlagen im Landwirtschaftlichen Bereich*; (FNR-FKZ: 00NR179);
- Zajączkowski, K. (2003). *Plantacyjna uprawa drzew i krzewów na gruntach porolnych*. [w:] *Zalesienia w Europie. Doświadczenia i zamierzenia*. [red:] Zajac St., Gil W. Prace IBL, Problemy Współczesnego Leśnictwa, 1, IBL, Warszawa, 226-239.
- Zajączkowski, K. (2006). Plantacje leśnych gatunków drzew szybko rosnących – stan obecny i perspektywy rozwoju. *Głos Lasu*, 37(6), 6-10.
- Zamet.org.pl, <http://www.zamet.org.pl/oferta-6>
- Zang, Y.; Dube, M. A.; McLean, D. D. et alt. (2003). Biodiesel Production from Waste Cooking Oil: 1. Process Design and Technological Assessment, *Bioresource Technology*, 89, 1-16.
- Zawistowski, J. (2007) Działania producentów energii elektrycznej i ciepłej na przykładzie BOT GiE S.A. Referat wygłoszony na konferencji pt. Biomasa dla elektroenergetyki i ciepłownictwa. Szanse i problemy. SGW Warszawa 27-28 luty 2007 r
- Zwischenbericht; Institut für Technologie i Systemtechnik/Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL); Braunschweig, 51-75
- Żmijewski, K. (red.) (2013). Raport: *Program gospodarki niskoemisyjnej na terenach wiejskich*. Forum Inicjatyw Rozwojowych. Pozyskano z <http://www.wlasnaelektrownia sloneczna.pl/Raport%20Program%20Gospodarki%20Niskoemisyjnej%20na%20terenach%20wiejskich.pdf>

Strony internetowe:

Adlib.eversite.co.uk, / <http://adlib.eversite.co.uk/>
Adrianolek, <http://adrianolek.com/naukajazdy/pliki/maszyny/praca/Kprasy.html>
Aeroab.com, <http://www.aeroab.com/pl/art/39/lt-master.html>
Agrom.pl, <http://agrom.pl/uslugi-rolnicze/zbior-zielonek-na-sianokiszonke>
Agropartner.pl, http://www.agropartner.pl/produkt-196-sadzarka_do_topoli_i_wierzby_energetycznej_spapperi_tp.html
Göecke, http://www.goecke-baumaschinen.de/goecke-lohnunternehmen-galerie-landwirtschaft.php?show_galerie=20.
GUS. 2011. *Energia ze źródeł odnawialnych w 2010r.*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa.
Korbanek.pl, http://www.korbanek.pl/domhandlowy/pl/claas/prasy/variant_350370/variant_350.html
Krajowy Plan Działania (2013). Pozyskano z <http://www.mg.gov.pl/Bezpieczenstwo+gospodarcze/Energetyka/Odnawialne+zrodla-energii/Krajowy+plan+dzialan>
Krajowy Plan Rozwoju Mikroinstalacji Odnawialnych Źródeł Energii. Pozyskano z: http://www.ieo.pl/pl/ekspertyzy/doc_details/651-krajowy-plan-rozwoju-mikroinstalacji-odnawialnych-rode-energii.html
Net-metering: zmiany dla prosumentów w nowym projekcie ustawy o OZE. Pozyskano z <http://gramwzielone.pl/energia-sloneczna/net-metering-zmiany-dla-prosumentow-w-nowym-projekcie-ustawy-o-oze>
NORDIC BIOMASS-sezonowanie. <https://picasaweb.google.com/nordicbiomass/LoadingWillow>
Piomaragrotech.pl, <http://www.piomaragrotech.pl/node/374>
Raport „Energetyka prosumencka – możliwości i korzyści dla odbiorcy końcowego”. Pozyskano z <http://www.etastowarzyszenie.pl/?p=679>.
Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady 1774/2002/W z dnia 3 października 2002 r., wprowadzającego przepisy zdrowotne odnoszące się do produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego, nieprzeznaczonych do spożycia przez ludzi (Dz. Urz. WE L 273 z 10.10.2003)
RPT.pl, <http://rpt.pl/archiwum/33-9-2010/195-na-jeden-lub-dwa-rzedy>
Salix.se 1, <http://www.salix.se/index.php?section=84>
Salix.se 2, <http://www.salix.se/index.php?section=85>
Tapfrance.info. <http://tapfrance.info/conteneur-souple-big-bag-une-solution-de-stockage-economique/>
www.energiaidom.pl/biomasa-biogaz-biopaliwa
www.ieo.pl/...badan/Biogaz%20-%20Produkcja%20Wykorzystywanie.pdf
Ze.strefa.pl, <http://www.ze.strefa.pl/index2.php?main=galeria.htm>



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Biuro Projektu:

Centrum Transferu Technologii
Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie
Biuro Programów Europejskich
Kraków, al. Mickiewicza 21, pok. 6
tel. +48 12 662 44 25
e mail: bpe@ur.krakow.pl
<http://www.potencjaldydaktyczny.ur.krakow.pl/>

Zespół Zarządzający

mgr Magdalena Pardyjak – kierownik projektu
mgr Gabriel Szczepański – koordynator projektu
mgr Robert Malaca – specjalista ds. sprawozdawczości finansowej
mgr inż. Adelina Kasprzak – specjalista ds. monitoringu
mgr inż. Marta Ledwoń – specjalista ds. obsługi administracyjnej

Organizator studiów podyplomowych**„Technologie energetycznego wykorzystania roślin”:**

Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki
ul. Balicka 116 b, 30-149 Kraków

Zespół:

Kierownik SP: **dr inż. Krzysztof Mudryk**
tel. 12 662 46 45, e-mail: krzysztof.mudryk@ur.krakow.pl
Sekretarz SP: **dr inż. Marek Wróbel**
tel. 12 662 46 45, e-mail: mrkwrobel1975@gmail.com

Publikacja współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego.
Wydano za zgodą Rektora Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie