

Wpłynęło 28.11.2012 r.  
Zrecenzowano 20.12.2012 r.  
Zaakceptowano 24.01.2013 r.

A – koncepcja  
B – zestawienie danych  
C – analizy statystyczne  
D – interpretacja wyników  
E – przygotowanie maszynopisu  
F – przegląd literatury

## **Energia z biomasy – efektywność, sprawność i przydatność energetyczna. Cz. 1**

**Andrzej ROSZKOWSKI**<sup>ABCDEF</sup>

*Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Oddział w Warszawie*

### **Streszczenie**

W pracy dokonano przeglądu i analizy czynników decydujących o efektywności energetycznej różnych rodzajów biomasy. Wykazano obiektywne trudności, wynikające ze zróżnicowania definicji i klasyfikacji biomasy, braku ustalonych metod analitycznych określających jej cechy oraz kwantyfikujących ilościowo i jakościowo przydatność, uwarunkowania i ograniczenia wykorzystania w głównych technologiach pozyskiwania bioenergii z biomasy (lub z jej udziałem). Uwzględniono biomasę pochodzenia leśnego i rolniczego (uprawy energetyczne, produkty główne, dodatkowe i odpadowe, tłuszcze roślinne i zwierzęce, substraty do wytwarzania biogazu). Wykazano uzależnienie wskaźników efektywności energetycznej od wielkości uzyskiwanych plonów w warunkach rzeczywistych, technologii pozyskiwania biomasy, nakładów energii na niezbędne pomocnicze operacje technologiczne i uzyskiwane sprawności konwersji na określone postacie energii. Rosnące zapotrzebowanie, zwłaszcza na energię elektryczną i paliwa transportowe (określane też jako biomasa płynna), wywołuje dążenie do wykorzystywania różnych źródeł energii odnawialnej, w tym i biomasy, co nie zawsze odpowiada wymogom dodatkowej efektywności energetycznej, zachowania środowiska naturalnego i produkcji żywności. Ograniczenia pozyskiwania energii z biomasy wymuszają konieczność modyfikowania obowiązujących regulacji prawnych i ekonomicznych tak w UE, jak i w Polsce. Wymuszanie uprawy roślin energetycznych na obszarach o ograniczonej przydatności do produkcji żywności spowoduje prawdopodobny spadek plonów z 10–12 t·ha<sup>-1</sup> do 3–10 t·ha<sup>-1</sup>. Najbardziej „pewnym” rodzajem bioenergii wydają się być gazy otrzymywane z przetwarzania odpadów organicznych, osadów i szlamów ściekowych, wysypisk i innych źródeł biologicznych, głównie ze względu na ich uciążliwość dla środowiska, a nie uzyskiwanie bezpośrednich korzyści energetycznych. W części II pracy zostaną omówione oddziaływania podstawowych czynników technologicznych i innych na sprawność i efektywność pozyskiwania energii z biomasy.

**Słowa kluczowe:** bariery technologiczne, przyrodnicze i gospodarcze, biopaliwa, bioenergia, biomasa, ciepło, efektywność, energia elektryczna, sprawność konwersji

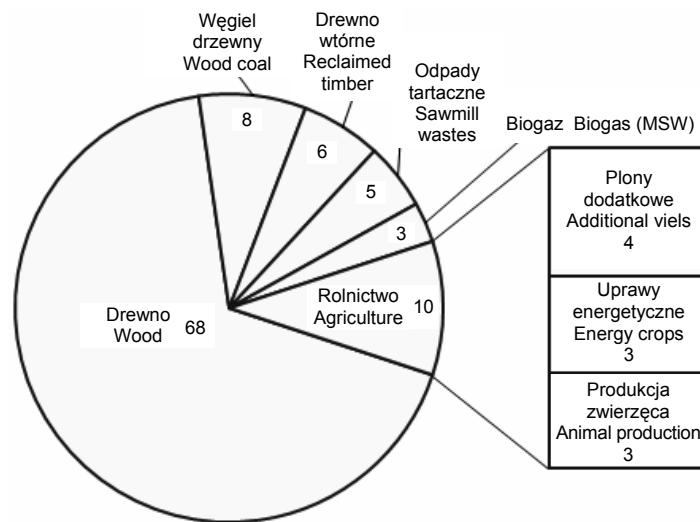


## Wstęp

W literaturze i większości dokumentów Unii Europejskiej za biomasę uznaje się całość istniejącej na Ziemi materii organicznej, czyli wszystkie substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, ulegające rozkładowi biologicznemu. Pojęcie biomasy obejmuje zatem także biodegradowalne części produktów, odpady i pozostałości przemysłu rolnego (wraz z substancjami roślinnymi i zwierzęcymi), leśnictwa i związanych z nim gałęzi gospodarki, jak również podatne na rozkład biologiczny frakcje odpadów przemysłowych i miejskich, w tym ścieki komunalne. Zróżnicowanie potencjalnego pochodzenia biomasy rolniczej oraz dążenie do energetycznego wykorzystywania jej nowych źródeł, w tym nowych lub wprowadzanych gatunków (odmian) roślin, jest przyczyną trudności w systematyce i definicjach biomasy [CASTILLO i in. 2010; FAGERNÄS i in. 2006; FISCHER i in. 2010a, b; KALTSCHMITT i in. 2009; KOŁODZIEJ, MATYKA (red.) 2012].

Rolnictwo nie wytwarza energii – konieczna jest konwersja biomasy jako głównego energetycznego produktu rolnego. Dla świata biomasa dostarcza ok. 14% energii, w krajach rozwijających się 33%, ale w krajach rozwiniętych jest to tylko 2–3% (rys. 1) [IEA 2009; 2010; 2011]. W Polsce od wielu lat energetyczne wykorzystanie biomasy ogranicza się do biomasy stałej (88% w 2008 r.), a tylko ok. 6% przeznaczona jest do przetwarzania na odnawialne paliwa transportowe. Energetyczne wykorzystywanie rolniczej przestrzeni produkcyjnej stwarza niebezpieczeństwo zakłóceń na rynkach żywnościowych świata. Wskutek aktualnych uwarunkowań ekonomicznych i legislacyjnych rynki energii zaczynają „kierować” rynkami rolniczymi. Decyzje produkcyjne, dotyczące energetycznych upraw rolniczych, są obecnie podejmowane na podstawie niepełnych analiz energetycznych i ekologicznych [Extension 2012; STRAŠIL, KÁRA 2010], często pod wpływem zmiennych uregulowań ekonomicznych (systemy dotacji) i wahań cen zbytu wytwarzanych produktów. Produkcja rolnicza na cele energetyczne powinna być optymalizowana pod względem efektywności energetycznej, a nie cech jakościowych, dominujących w konwencjonalnym wytwarzaniu żywności i pasz [BEDB 2012; FISCHER i in. 2010; FRĄCZEK (red.) 2010; GOŁĘBIEWSKA (red.) 2009; KOŁODZIEJ, MATYKA (red.) 2012; ROSZKOWSKI 2009; 2012a, b].

Wypieranie upraw na cele żywnościowe (konkurencyjność) przez uprawy na cele energetyczne potencjalnie zagraża stosunkom białko – energia w produktach roślinnych, a także sprzyja rozpowszechnianiu odmian GMO. Analiza kilkuletnich danych wykazuje, że średnie plony biomasy w krajach UE są o 25–55% mniejsze niż średnie najwyższe plony podobnych upraw w tych samych przedziałach czasowych [BLAKE i in. 2008; BOEHMEL i in. 2008; BOYD i in. 2001; CHERNEY i in. 1991; FISCHER i in. 2010a, b; KOŁODZIEJ, MATYKA (red.) 2012; KOPETZ i in. 2007; de WITT, FAAIJ 2010;]. Należy zwrócić uwagę, że wykonane szacunki [FISCHER i in. 2010a, b; MANTAU (red.) 2010; RASCHKA, CARUS 2012] wykazują, że obecnie drewno stanowi ok. 80% biomasy przeznaczanej na wytwarzanie energii, co odpowiada zbiorowi 60–70% rocznego przyrostu lasów. Do 2010 r. wykorzystywano przemysłowo 458 Mm<sup>3</sup> (229 Mt) drewna, w tym ok. 346 Mm<sup>3</sup> (173 Mt) do wytwarzania



Źródło: opracowanie własne na podstawie: IEA [2011].  
 Source: own elaboration based on: IEA [2011].

Rys. 1. Struktura [%] pochodzenia źródeł biomasy w UE  
 Fig. 1. Percentage structure of biomass sources origin in the EU

energii [MANTAU (red.) 2010; SMEETS, FAAIJ 2007]. Brak jest jednak wiarygodnych danych, dotyczących struktury pochodzenia i wykorzystania drewna – ok. 42% to drewno tartaczne, ok. 31% zużywa przemysł papierniczy i ok. 26% ma inne zastosowania przemysłowe [RASCHKA, CARUS 2012]. Całkowite zużycie drewna z różnych źródeł szacowane jest na ok. 1 mld t, w tym ok. 70% pochodzi z produkcji leśnej, a pozostałe ok. 30% ze źródeł wtórnych (miejskie tereny zielone, drewno wtórne z wykorzystanych wyrobów [MANTAU (red.) 2010]. Autorzy większości opracowań uważają, że energetyczne wykorzystanie drewna z biomasy lasów pozostanie na dotychczasowym poziomie, a uzyskanie zakładanego przez organy UE energetycznego wykorzystania 2/3 biomasy w 2020 r. uwarunkowane jest przede wszystkim wzrostem ilości i dostępności biomasy z produkcji rolniczej.

Opłacalna produkcja energii z biomasy w rolnictwie zrównoważonym wymaga na ogół intensywnych, wydajnych technologii, zapewniających uzyskanie plonów na poziomie 8–12 t s.m. z hektara rocznie, co budzi obawy o niekorzystne oddziaływanie na środowisko (nawozy, chemia, bioróżnorodność) [BEDB 2012; BOERJESSON 1996; 1999; BTC 2012; CZYŻ, DAWIDOWSKI 2005; EEA 2007; HERMANN i in. 2005; KEOLEIAN, YOLK 2005; KOŁODZIEJ, MATYKA (red.) 2012]. Każdy produkt, a zwłaszcza metody pozyskiwania i wykorzystywania różnych postaci energii, wywiera wpływ na środowisko naturalne w czasie cyklu życia (LCA – Life Cycle Assessment), obejmującego wszystkie etapy, tj. wykorzystanie surowców i zasobów naturalnych, produkcji, pakowania, transportu, utylizacji (usuwania) i recyklingu [DAUGHERTY 2001; FAZIO, MONTI 2011; MAIN i in. 2007; ROSZKOWSKI 2009; 2012a, b]. Dodatkowymi barierami są wysokie koszty, konkurencja z potrzebami

przemysłu, utrudniona logistyka surowcowa [BEDB 2012; BOERJESSON 1996; CUNDIFF, GRISSO 2008; DRESZER i in. 2003; KRASUSKA, ROSENQVIST 2012].

Efektywność energetyczną określa się stosunkiem uzyskanej wielkości efektu użytkowego danego obiektu, urządzenia technicznego lub instalacji, w typowych warunkach ich użytkowania lub eksploatacji, do ilości zużycia energii przez ten obiekt, niezbędnej do uzyskania tego efektu [Dyrektywa 2012/27/UE; Ustawa... 2011]. Efektywność energetyczną mierzy się stosunkiem wielkości zużycia energii (nakładów) do uzyskiwanej wielkości energii użytecznej, wyrażanym w procentach lub, rzadziej, ułamkach. Szacuje się, że popyt na energię w całym świecie w najbliższych 25 latach zwiększy się o 1/3, a efektywność energetyczna będzie się poprawiać w tempie dwukrotnie większym niż w ostatnich 25 latach [IEA 2011]. W perspektywie zwiększającego się zapotrzebowania na energię poprawa efektywności energetycznej (często określanej mianem 6. paliwa) oraz racjonalne wykorzystywanie istniejących zasobów energetycznych, są obszarami, do których, zarówno w Polsce, jak i w UE, przywiązuje się wielką wagę. Ustawa o efektywności energetycznej [Ustawa... 2011] oraz Krajowy Plan Działań (EEAP – Esri Enterprise Advantage Program) stwarza ramy prawne oraz system wsparcia działań, zapewniających wdrożenie dyrektyw europejskich w zakresie efektywności energetycznej, w tym zwłaszcza dyrektywy 2012/27/UE z października 2012 r., uchylającej dotychczasową dyrektywę 2006/32/WE [Dyrektywa 2012/27/UE]. Nowymi elementami tych działań są aplikacje dyrektywy RED (Renewable Energy Directive), promującej energię o odpowiedniej jakości ze źródeł odnawialnych [Dyrektywa 2009/28/UE] i dyrektywy 2009/30/WE (Fuel Quality Directive) o monitorowaniu i ograniczaniu emisji gazów cieplarnianych (GHG). Jeśli chodzi o efektywność energetyczną w ciągu ostatnich 10–12 lat w Polsce dokonał się ogromny postęp, jednak nadal wskaźnik ten dla gospodarki polskiej jest ok. 2 razy gorszy niż średnia w krajach Unii Europejskiej i wynosi ok.  $0,4 \text{ kg}_{\text{oe}} \cdot 1 \text{ €}^{-1} \text{ PKB}$  [Eurostat 2010; 2011; KOOP i in. 2010; SMUSZ 2010]. Zużycie energii pierwotnej w Polsce, odniesione do liczebności populacji, jest istotnie większe niż w krajach UE, a ponad 40% zużywanej energii przeznaczają się do ogrzewania gospodarstw domowych [Eurostat 2010; 2011]. Zgodnie z obowiązującymi zapisami ustaw energetycznych, zużycie energii finalnej w Polsce powinno zmniejszyć się o 9% do 2016 r., w stosunku do lat 2001–2005.

Te dążenia do zastępowania konwencjonalnych nośników energii źródłami odnawialnymi są hamowane stosunkowo wysokimi kosztami nowych technologii oraz wolnym tempem prac legislacyjnych i badawczo-rozwojowych w warunkach ograniczeń „kryzysowych”. Potwierdzeniem może być projekt krajowej ustawy o OZE, opublikowany dopiero w lipcu 2012 r. [Ministerstwo Gospodarki 2012], oraz informacje o wydatnym zmniejszeniu procentowego udziału energii odnawialnej w ogólnych bilansach, a zwłaszcza w paliwach transportowych, proponowanego poprzednio przez UE do osiągnięcia w 2020 r.

Pod względem fizykochemicznym i energetycznym biomasa może być uważana za rodzaj uniwersalnego „półsurowca”, ponieważ można z niej uzyskiwać wszystkie rodzaje nośników, jak energię cieplną i elektryczną, paliwa transportowe, łącz-

nie z perspektywicznymi paliwami wodorowymi i wiele produktów chemicznych (polimery) [BEDB 2012; CLARKE i in. 2011; DRESZER i in. 2003; KOŁODZIEJ, MATYKA (red.) 2012; KOPETZ i in. 2007; Nexant ChemSystems 2007; NIGAM, SINGH 2011; PERSSON i in. 2011; PICAZO-ESPINOZA i in. 2011; ROSZKOWSKI 2009; 2012a, b]. Ze względu na ogromną różnorodność budowy fizycznej i chemicznej biomasy oraz zawartość w niej wody, klasyfikacja metod otrzymywania energii z biomasy oraz same metody (technologie) są przedmiotem dyskusji i ciągłego doskonalenia.

Biomasa, w porównaniu z paliwami konwencjonalnymi, zawiera istotnie więcej tlenu w strukturach wiązań chemicznych, co powoduje mniejszą koncentrację energii w jednostce masy (gęstość energetyczna). Do cech ujemnych zalicza się także duże wahania składu chemicznego (azot, chlor, alkalia) i zawartości wody, tendencje do tworzenia smół oraz niską temperaturę topnienia popiołów [GRZYBEK (red.) 2010; FRĄCZEK (red.) 2010; KOŁODZIEJ, MATYKA (red.) 2012; KOMOROWICZ i in. 2009; ROSZKOWSKI 2009; 2012a, b; SZCZUKOWSKI (red.) 2012; VASSILEV i in. 2012a, b; WITZKE i in. 2008]. Tak duża niejednorodność i zmienność cech biomasy znacznie utrudnia opracowanie i przyjęcie przez kraje UE, a także i przez USA, wspólnych metod badawczych (standaryzacji, normalizacji) w odniesieniu do tak podstawowej cechy „energetycznej”, jaką jest wartość opałowa. Nawet obecnie stosowana definicja (określenie) biomasy, jako wszelkiej postaci materii organicznej, utrudnia jednoznaczną klasyfikację poszczególnych źródeł biomasy oraz ich kwantyfikację jakościową. W stosunku do zalecanych i obowiązujących metod badawczych używany jest termin „dla suchej biomasy”, ale brak jest jego (terminu) definicji. Zwyczajowo stosuje się termin „sucha” do biomasy o zawartości wody poniżej 25–30%. Konsekwencją stosowania takich ogólnikowych sformułowań jest używanie określeń biomasa „mokra” (odchody zwierzęce o zawartości wody 70–85%, osady ściekowe o zawartości wody ok. 80%, produkty odpadowe przetwórstwa rolnego o zawartości wody 93–95%) oraz określanie tłuszczów wtórnych i zwierzęcych jako półsuchych (ze względu na konsystencję), mimo zawartości wody poniżej 1%. Dodatkowa niejasność prawna wynika z braku wiążących ustaleń, dotyczących uznania osadów pościekowych za biomasę lub za odpady [CHALAMOŃSKI i in. 2008]. W przypadku wytwarzania biogazu metodami fermentacji anaerobowej, szczególnie duże trudności występują wskutek dążności do stosowania substratów o małej zawartości wody, co zwykle wymaga różnych źródeł (rodzajów) biomasy. Dodatkowym utrudnieniem jest brak ustalonych norm (standardów) jakościowych (i nie tylko), dotyczących wytwarzanego biogazu (zwłaszcza kierowanego do istniejących sieci gazu ziemnego), w warunkach jednoczesnego wzrastającego znaczenia pozyskiwania energii z biogazu wytwarzanego z biomasy zaliczanej do III generacji [BRAUN i in. 2009; DÖHLER i in. 2011; HUGUEN, le SAUX 2010; MCKENDRY 2002; MURSEC i in. 2009; ROSZKOWSKI 2012a, b].

Obecnie podstawowymi źródłami biomasy na cele energetyczne są różne odmiany drzew leśnych oraz liczne gatunki roślin, z których część określa się mianem upraw energetycznych. Duża liczba gatunków i odmienność w ocenach przydatności uprawianych na świecie roślin uznawanych za energetyczne, są powodowane zróżnicowaniem warunków glebowych i klimatycznych, określających

przydatność produkcyjną i środowiskową poszczególnych genotypów w rzeczywistych warunkach siedliskowych [BOERJESSON 1999; BORKOWSKA i in. 2009; CHOŁUJ i in. 2008; JARADAT 2010; KOŁODZIEJ, MATYKA (red.) 2012; KUŚ, MATYKA 2009; MATYKA 2008]. Zaostrzenie wymagań dla roślin przeznaczonych na cele energetyczne odnośnie do ich uprawy przede wszystkim na obszarach marginalnych, o ograniczonej przydatności do produkcji żywności, spowoduje prawdopodobny spadek plonów z obecnych 10–12 t·ha<sup>-1</sup> do 3–10 t·ha<sup>-1</sup>. Mimo tych „niedogodności” stosunkowo mała zawartość siarki i popiołów w biomasie i duża jej reaktywność pozwalają uznać jej właściwości chemiczne za korzystne (w porównaniu z węglem).

Energetycznego przekształcenia (przemiany) biomasy dokonuje się dwiema metodami: termochemicznymi i biologicznymi. Niektórzy autorzy używają dodatkowego pojęcia metody fizykochemicznej w odniesieniu do procesów estryfikacji.

W procesach termicznej konwersji (depolimeryzacji, zgazowania) biomasy o zawartości wody 5–30% (biomasa „sucha” lub „stała”) uzyskuje się energię cieplną i paliwa w postaci stałej, ciekłej i gazowej. Proces zgazowania poprzedzony jest przygotowaniem biomasy do postaci wsadowej (określona wielkość cząstek, wstępne procesy dla tłuszczów zwierzęcych, suszenie i in.). W innych procesach (technologiach) otrzymuje się na ogół tylko jeden rodzaj nośnika energii [BRAUN 2007; BRAUN i in. 2009; BRIDGWATER 2012; IEA BIOENERGY 2007; LEWANDOWSKI i in. 2010; PRINS 2005].

Procesy termochemiczne polegają na termicznej przemianie biomasy w płyny, gazy i paliwa stałe do dalszego przetwarzania i obejmują także operacje (procesy) pośrednie, jak: piroliza, redukcja, spalanie i reforming. Na skutek pirolizy z biomasy uzyskuje się produkty gazowe, oleje i smoły oraz fazę stałą. Udziały masowe tych produktów zależą od warunków i temperatury procesów pirolizy (piroliza wolna i szybka, karbonizacja). Produkty te mogą być wykorzystywane do wytwarzania energii cieplnej i elektrycznej oraz do produkcji paliw transportowych (po procesach syntezy chemicznej, katalizy, biokatalizy) i tzw. biopłynów. Z „surowych” półproduktów z biomasy uzyskuje się dużo (ok. 700) różnorodnych substancji chemicznych [BRAUN i in. 2009; BEDB 2012; IEA 2007; JUDY i in. 2011; KALTSCHMITT i in. 2009; KALTSCHMITT 2011; SPITZER 2011].

Metody termochemiczne są obecnie bardziej rozpoznane i rozpowszechnione, natomiast metody biologiczne uważane są za bardziej obiecujące pod względem efektywności energetycznej i kosztów. Do metod biologicznych zalicza się tradycyjne technologie fermentacji alkoholowej oraz rozkładu beztlenowego. Za nową technologię uważa się metodę fermentacji lignocelulozowej, a za szczególnie perspektywiczne biologiczne metody wytwarzania paliwa wodorowego – biowodoru. Badane są metody bezpośrednie, z użyciem organizmów żywych wykorzystujących energię fotonów słonecznych do wydzielania tlenu z wody (biofotoliza) i metody pośrednie, z użyciem mikroalg, wykorzystujących węglowodany z fotosyntezy do biologicznego przetworzenia na wodór (fermentacja dwustopniowa – ciemna i fotofermentacja). Procesy te teoretycznie powinny istotnie

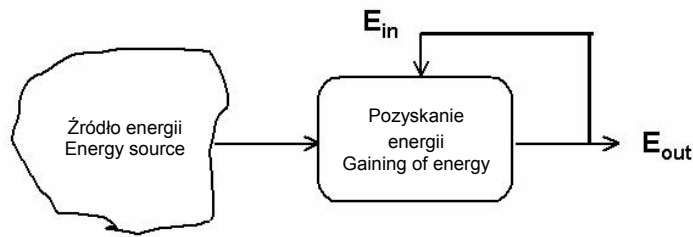
zwiększyć energetyczną efektywność fotosyntezy [BLAKE i in. 2008; CAPROS i in. 2010; JARADAT 2010; KALTSCHMITT 2011; KAVALOV, PETEVES 2005; HERMAN i in. 2005; ROSZKOWSKI 2012a, b; de SCHAMPHELAIRE, YERSTRAETE 2009]. Oprócz podziału na metody termochemiczne i biologiczne stosuje się także podział według przydatności biomasy („sucha” i „mokra”) do określonej technologii konwersji.

Do dalszej analizy i porównania efektywności energetycznej przyjęto, że głównymi rodzajami biomasy są produkty roślinne uzyskiwane z roślin uprawnych (drzewa, krzewy, byliny, zboża – plony główne i dodatkowe, jak np. słoma), oleje roślinne oraz odchody, a także odpady z produkcji zwierzęcej (gnojowica, tłuszcze wtórne i odpadowe).

Celem pracy jest dokonanie przeglądu obecnych problemów i barier (utrudnień, ograniczeń, uwarunkowań), dotyczących obiektywnych analiz metod i ocen efektywności energetycznej wykorzystania bądź zastosowania biomasy jako surowca do wytwarzania i przetwarzania na różne nośniki energii. W pracy wykorzystano opracowania i rezultaty badań opublikowanych w literaturze przedmiotu oraz wyniki własnych badań studyjnych.

### Wskaźniki efektywności energetycznej

W celu porównania i oceny efektywności oraz przydatności energetycznej (pojmowanej jako suma bezzwrotnych strat energii pierwotnej) stosuje się różne metody wskaźnikowe, wykorzystujące stosunki liczbowe nakładów poniesionych do uzyskanych w całym lub częściowym cyklu wytwarzania bądź wytwarzania i użytkowania produktu lub wyrobu ( $energy_{out}/energy_{in}$ ). Do oceny produktów o cechach nośników energii (ciepło, energia elektryczna) lub „paliw” zazwyczaj stosuje się wskaźnik EROEI (Energy Returned on Energy Invested), tożsamy ze wskaźnikiem EROI (Energy Returned on Investment), schematycznie przedstawiony na rysunku 2. W ocenach ponoszonych nakładów energetycznych na wytworzenie określonego produktu (wyrobu) powinno stosować się metodologię LCA, przyjętą przez International Organization for Standardization [ISO 2006] i obejmującą sumę nakładów ponoszonych w całym cyklu użytkowania danego wyrobu – od wytworzenia do utylizacji, z wyliczeniem lub przynajmniej oszacowaniem nakładów energetycznych, ekonomicznych (kosztów) i ekologicznych (usuwanie negatywnych lub uwzględnianie pozytywnych skutków oddziaływania na środowisko) [BOERJESSON 1996; DAUGHERTY 2001; FREIERMUTH i in. 2007; HELLER i in. 2003; KOŁODZIEJ, MATYKA (red.) 2012; MAIN i in. 2007; ROSZKOWSKI 2009; 2012a, b; STRASIL, KARA 2010; WĘGRZYN, ZAJĄC 2008]. Dodatkowym utrudnieniem w ścisłych wyliczeniach bilansów energetycznych są rozbieżności w szacunkach ilości energii zawartej w różnych postaciach (rodzajach) zużywanej energii (np. wartość cieplna baryłki surowej ropy naftowej waha się w granicach 5,6–6,8 MBtu). W bilansach zużycia energii w UE jako jednostki stosuje się pochodne paliwa umownego w  $t_{oe}$ , a w USA dzienne zużycie w baryłkach (barrel) ropy. Ze względu na złożoność procedur, poprawnie określających nakłady i efekty według metody LCA oraz niewielką liczbę opublikowanych



$$\text{ERol} \Rightarrow \text{Energy Return on Investment} = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}}$$

$$\text{ERoEI} \Rightarrow \text{Energy Return on Energy Investment} = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}}$$

$$\text{NEV} \Rightarrow \text{NET Energy Value} = E_{\text{out}} - E_{\text{in}}$$

$$\text{FER} \Rightarrow \text{Fossil Energy Ratio} = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{fossil}}}$$

$$\text{FES} \Rightarrow \text{Fossil Energy Savings} = E_{\text{out}} - E_{\text{fossil}}$$

ERol – zwrot energii z inwestycji

ERoEI – zwrot energii z inwestycji energetycznej

NEV – uzysk energii netto

FER – wskaźnik substytucji paliw konwencjonalnych

FES – oszczędność energii z paliw konwencjonalnych

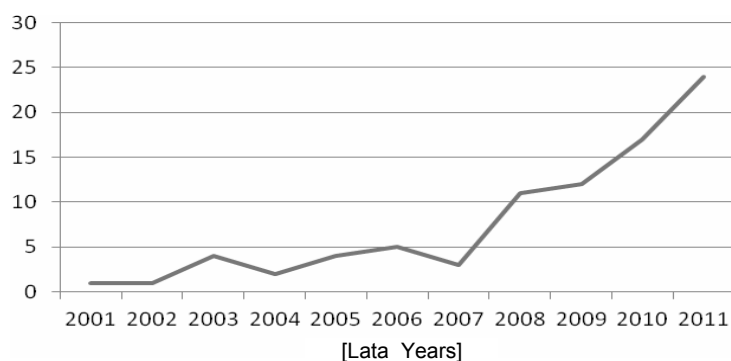
Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

Rys. 2. Wskaźniki efektywności i sprawności energetycznej  
Fig. 2. Indices of effectiveness and energetic efficiency

nych badań (rys. 3), Komisja Europejska dopuszcza określenie efektywności energetycznej metodą WTW (Well to Wheels) [Dyrektywa 2012/27/UE; HUANG, ZHANG 2011; MAIN i in. 2007], obejmującą wszystkie „pozycje” energetyczne, niezależnie od postaci energii (paliwa ciekłe, stałe i gazowe, energia cieplna i elektryczna). W tych przypadkach stosuje się wskaźnik NER (Net Energy Ratio), określający, jaką ilość paliwa konwencjonalnego można zastąpić paliwem „odnawialnym”. Niedogodnością tego uproszczenia jest brak uwzględniania w sumarycznych nakładach (bilansach) na energię odnawialną „zysków energetycznych” możliwych do osiągnięcia z wykorzystania takich produktów, jak pasze z wyłoków rzepaku lub mokrego przemiału ziarna czy nawozy z produkcji biogazu metodami fermentacji. Brak uwzględniania tych dodatkowych wartości powoduje zaniżanie ocen efektywności, np. dla bioetanolu I generacji z ziarna kukurydzy NER = 0,88 bez uwzględnienia pasz i NER = 2,62 z ich uwzględnieniem, a dla bioetanolu II generacji (z surowców lignocelulozowych) odpowiednie wartości NER wynoszą 5,8 i 6,7 [AFCEE 2012].

Oceny dokonane dla rozpowszechnionej wierzby energetycznej (w ciągu 23 lat uprawy) z zastosowaniem metody LCA [BOYD i in. 2001; HELLER i in. 2003; SZCZUKOWSKI (red.) 2012] wykazały, że „teoretyczna” efektywność energetyczna uprawy wahała się od 40 do 58, jednak w rzeczywistości wskaźnik ten wynosił średnio 10–11, a więc był ok. 5 razy mniejszy. Jednym z głównych składników na-





Źródło: opracowanie własne na podstawie: RUVIARO i in. [2012].  
Source: own elaboration based on: RUVIARO et al. [2012].

Rys. 3. Liczba publikacji wyników analiz LCA produktów rolnych  
Fig. 3. Number of published results of LCA analyses for agricultural products

kładów energetycznych były nawozy, zwłaszcza azotowe i paliwa (udział po ok. 40%) [SZCZUKOWSKI (red.) 2012]. Podobne wyniki badań [KOZŁOVA 2006] uzyskano, analizując nakłady na produkcję zbóż (plon energii 30–40 GJ·ha<sup>-1</sup>), gdzie wskaźnik efektywności energetycznej wynosił 2,0–4,25 z udziałem nawozów w nakładach 37–50%, a w uprawie traw wieloletnich na 3,5–4,0 [MAIN i in. 2007].

W wytwarzaniu substratów do produkcji biogazu o zawartości suchej masy 13–30% nawozy pochłaniają 50% nakładów energetycznych, technologie zbioru i transportu 22%, paliwo 15% i pestycydy 13% [BRAUN i in. 2009]. Dokonane zestawienia ocen efektywności energetycznej w rzeczywistych warunkach produkcyjnych [MAIN i in. 2007] wykazały, że podczas wytwarzania energii cieplnej i elektrycznej największe wartości wskaźników efektywności (6–13) uzyskuje się ze zrębków z wierzby, z roślin wieloletnich (proso różgowate, mozga, trawy z TUZ) – 6–8, a najmniejsze wartości wskaźników odnoszą się do etanolu z ziarna zbóż i estrów z rzepaku – 2,5–3,5 [MAIN i in. 2007]. Wartości wskaźników efektywności energetycznej pozyskiwania energii z biomasy z wykorzystaniem biogazu wynoszą od 1,4 do 5,5 w „dobrych” warunkach [BRAUN i in. 2009; HUOPANA 2011]. W ocenach uzyskiwanych plonów energii dotychczas brak jest ustalonych poglądów, dotyczących nakładów na produkty uboczne (słoma zbóż, kukurydzy czy trzciny cukrowej) i dodatkowych (wytłoki i gliceryny z rzepaku). Większość autorów publikacji uważa za niezbędne uznanie dodatkowo uzyskiwanych ilości energii z jednoczesnym nieuznawaniem nakładów materiałowych i kapitałowych na ich pozyskanie [de WITT, FAAIJ 2010]. Wszyscy autorzy zwracają uwagę na celowość uwzględniania czynników ekonomicznych (koszty nakładów inwestycyjnych i energetycznych) oraz czynników trudno wymiernych, a związanych z ochroną lub uciążliwością dla środowiska (wykorzystanie biomasy odpadowej, wysypisk, osady ściekowe itp.). Przeciętne roczne plony energii i strukturę ponoszonych kosztów pozyskania i nakładów robocizny przedstawiono w tabelach 1 i 2.

Tabela 1. Udział upraw roślin energetycznych na glebach o różnej jakości i ich plony  
 Table 1. Share of energy crops cultivated on different quality soils and their yields

Wyszczególnienie Specification	Udział gleb Share of soils [%]			Plony na glebach [t s.m.·ha <sup>-1</sup> ] Yields on soils [t d.m.·ha <sup>-1</sup> ]		
	bd. i db.	śr.	m.p. i n.p.	bd. i db.	śr.	m.p. i n.p.
Lasy energetyczne (wierzba, topola) Energy forests (willow, poplar)	48	25	20	11,8	7,0	3,9
Byliny (ślazowiec, rożnik) Perennial plants ( <i>Sida hermaphrodita</i> , <i>Silphium Perfoliatum</i> L.)	b.d.			–	ok. 9,0	–
Trawy wieloletnie (miskant olbrzymi, proso różgowate, mozga trzcinowata) Perennial grasses ( <i>Miscanthus gigan-</i> <i>teus</i> , <i>Panicum virgatum</i> F. Muell., <i>Phalaris arundinacea</i> L.)	51	17	32	14,2	8,9	5,0
Ruń łąkowa (kostrzewa trzcinowa, życi- ca trwała, tymotka, wyczyniec łąkowy) Meadow sward ( <i>Festuca arundinacea</i> Schreb., <i>Lolium perenne</i> L., <i>Phleum</i> <i>pratense</i> L., <i>Alopecurus pratensis</i> L.)	0	25	75	b.d.	4,2	3,0
Rzepak Oiled rape	52	15	23	1,3	0,8	0,5
Buraki cukrowe Sugar beets	42	15	38	7,4	4,5	2,6
Zboża (pszenica, pszenżyto, kukurydza) Cereals (wheat, triticale, maize)	56	19	30	7,2	3,4	2,8
Słoma średnio (zboża <sup>1)</sup> , kukurydza <sup>2)</sup> , rzepak <sup>3)</sup> Straw on average (cereals <sup>1)</sup> , maize <sup>2)</sup> , rape <sup>3)</sup> )	b.d.			4,4–5,1 <sup>1)</sup> ; 7,2–7,7 <sup>2)</sup> ; 2,2 <sup>3)</sup>		

<sup>1)</sup> Sucha masa (s.m.). <sup>1)</sup> Dry matter (d.m.).

<sup>2)</sup> Masa korzeni o zawartości 75% H<sub>2</sub>O i 15% cukru.

<sup>2)</sup> Mass of roots at contents of 75% H<sub>2</sub>O and 15% sugar.

<sup>3)</sup> Ziarno, nasiona. <sup>3)</sup> Grain, seeds.

Objaśnienia: gleby bd. i db. – bardzo dobre i dobre, śr. – średnie, m.p. – mało przydatne, n.p. – nieprzydatne, b.d. – brak danych.

Explanations: soil very good (bd.) and good (db.), medium (śr.), m.p. – little usable, n.p. – not useful; b.d. – no data available.

Źródło: opracowanie własne na podstawie: FISCHER i in. [2010a] i inne dane literaturowe.

Source: own elaboration based on: FISCHER et al. [2010a] and other data from the literature.

Wartość wskaźnika EROI <1 teoretycznie oznacza, że zużycie nośników energii na wytworzenie jednostki energii użytecznej jest większe niż ilość energii możliwej do pozyskania. Ze względu na stosunkowo duże wahania wartości energetycznej za bezpieczną granicę przydatności energetycznej uznaje się wielkość EROI >5–10 (rys. 2). Wahania wartości energetycznej konwencjonalnych, ale ciągle podstawowych nośników energii, są spowodowane istotnym zwiększaniem się nakładów energetycznych (i materiałowych) na ich wydobycie i pozyskanie (łupki, złoża podmorskie, piaski roponośne). Z kolei przyczyną dużych wahań publikowanych wartości energetycznej surowców energetycznych z biomasy są silne interakcje środowiska i wytwarzanej biomasy (a także mała liczba dostępnych wyników badań

Tabela 2. Struktura nakładów przy wytwarzaniu biomasy z upraw energetycznych  
Table 2. Structure of the inputs at biomass production from energy crops

Wyszczególnienie Specification	Struktura nakładów Structure of inputs [%]			Robocizna [rbh·ha <sup>-1</sup> ] Labour [work-hrs ·ha <sup>-1</sup> ]	Plony min-max [t s.m.·ha <sup>-1</sup> ] Yields min-max [t d.m.·ha <sup>-1</sup> ]	Wskaźnik uzysku energii brutto Index of gross energy output [GJ·t <sup>-1</sup> ]
	zakładanie i produkcja polowa arrangement and field production	zbiór, transport i przecho- wywanie harvest, transport and storage	inne other			
Lasy energetyczne (wierzba, topola) Energy forests (willow, poplar)	76	23	1	5,1	3,9–13,6	9,6 <sup>1)</sup>
Byliny Perennial plants	b.d.				8,0–10,0	12,5 <sup>1)</sup>
Trawy wieloletnie (miskant olbrzymi, proso różgowate) Perennial grasses ( <i>Miscanthus gigan- teus</i> , <i>Panicum virga- tum</i> F. Muell.)	36 13	64 84	0 3	6,6 9,7	5,0–15,9	9,3 <sup>1)</sup>
Ruń łąkowa Meadow sward	b.d.				2,2–4,5	2,6–4,5 <sup>1)</sup>
Rzepak <sup>3)</sup> Oilseed rape <sup>3)</sup>	29	68	3	7,2	0,5–1,5 <sup>1)</sup>	14,4 <sup>1)</sup>
Buraki cukrowe <sup>2)</sup> Sugar beets <sup>2)</sup>	38	59	3	8,8	2,7–8,2 <sup>2)</sup>	2,1 <sup>2)</sup>
Zboża (pszenica, pszenżyto, kukurydza) Cereals (wheat, triti- cale, maize)	47	42	11	4,4	2,8–7,2	7,5–7,9 <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Sucha masa (s.m.). <sup>1)</sup> Dry matter (d.m.).

<sup>2)</sup> Masa korzeni o zawartości 75% H<sub>2</sub>O i 15% cukru.

<sup>2)</sup> Mass of roots at contents of 75% H<sub>2</sub>O and 15% sugar.

<sup>3)</sup> Ziarno, nasiona. <sup>3)</sup> Grain, seeds.

Objaśnienie: b.d. – brak danych. Explanation: b.d. – no data available.

Źródło: opracowanie własne na podstawie: de WITT, FAAIJ [2010] i inne dane literaturowe.

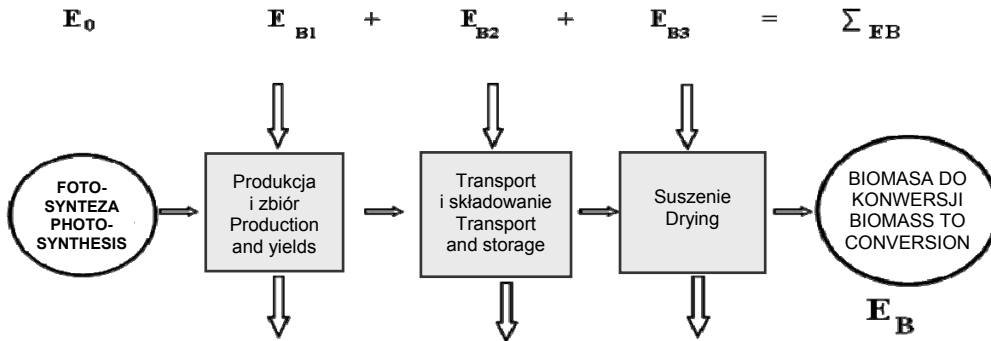
Source: own elaboration based on: de WITT, FAAIJ [2010] and other data from the literature.

[BOERJESSON 1999; CHOŁUJ i in. 2008; KOŁODZIEJ, MATYKA (red.) 2012]. Z tych względów oceny efektywności konkretnego rodzaju biomasy na technologicznie określone cele energetyczne wymagają wnikliwych i wszechstronnych analiz.

### Analiza energetycznej efektywności wykorzystywania biomasy

Efektywność energetycznego wykorzystania biomasy powinna być analizowana w dwóch, a w przypadku wytwarzania paliw i produktów podobnych, nawet

w trzech etapach. Etap pierwszy (rys. 4) to uzyskanie maksymalizacji plonu biomasy  $E_O$  (obliczanego w suchej masie o określonym składzie chemicznym), z jednoczesnym dążeniem do ograniczenia ponoszonych nakładów materiałowych i energetycznych  $E_B$ . Wielkość nakładów  $E_B$  określa się jako sumę nakładów energetycznych poniesionych na wyprodukowanie biomasy (nawozy, uprawa, zbiór, przechowywanie, transport do miejsc przetwarzania), a  $E_O$  jest energią zawartą w plonie na polu. Ilość energii w wytworzonej biomacie  $E_{BM}$  jest określana jako różnica między  $E_{BM} = E_O - E_B$ , a sprawność energetyczna tego etapu to  $\eta_{BM} = (E_O - E_B)/E_O$ .



Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

Rys. 4. Etap I – sprawność energetyczna wytwarzania biomasy  
 Fig. 4. Stage I – energetic efficiency of biomass generation

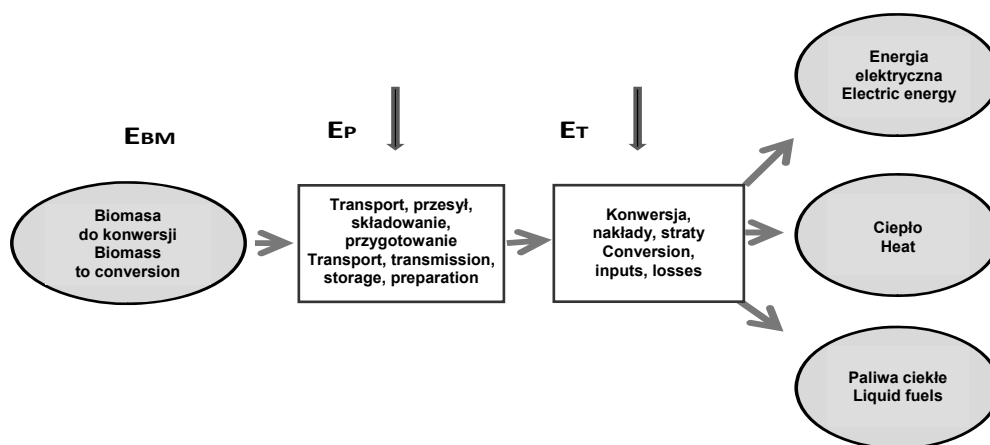
Drugi etap analizy obejmuje nakłady energetyczne  $E_P$  na przygotowanie biomasy do przetworzenia (rozdrabnianie, suszenie, mieszanie, przesyłanie) i nakłady ponoszone na procesy przetworzenia (konwersji)  $E_T$  z uwzględnieniem ewentualnych procesowych strat energii (rys. 5). Końcowa ilość energii  $E_K$  uzyskanej z biomasy jest różnicą między  $E_K = E_{BM} - (E_P + E_T)$ , a sprawność energetyczna tego etapu  $\eta_K = (E_{BM} - (E_P + E_T))/E_{BM}$ .

Etap trzeci obejmuje procesy użytkowego (końcowego) wykorzystania postaci (formy) uzyskanej z biomasy energii, w tym  $E_D$  (nakłady ponoszone na dystrybucję, przesył itp.) i energią użyteczną  $E_U$  (energia kinetyczna pojazdu, odebrana energia cieplna, elektryczna itp.). Ponieważ etap trzeci obejmuje nakłady w zasadzie nie dotyczące biomasy, za efektywność energetyczną jej (biomasy) przetworzenia (konwersji) na energię uznaje się:

$$EE_{BM} = E_{BM}/E_K \quad (1)$$

W przypadku jednoczesnego pozyskiwania z biomasy energii cieplnej i elektrycznej pewną trudność stanowi określenie energetycznej sprawności cieplnej. W tym przypadku używa się wskaźnika:

$$\eta_{UE} = (E_{el} + 0,5E_{ter})/E_K \quad (2)$$



Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

Rys. 5. Etap II – sprawność energetyczna przetwarzania biomasy na nośniki energii  
Fig. 5. Stage II – energetic efficiency of biomass conversion into energy carriers

gdzie:

$\eta_{UE}$  – efektywność energetyczna współprocesów;

$E_{el}$  – pozyskana energia elektryczna;

$E_{ter}$  – pozyskana energia cieplna;

$E_K$  – energia cieplna zawarta w zużytej biomasie z uwzględnieniem wartości opałowej netto LHV.

W odniesieniu do paliw transportowych występuje także pojęcie efektywności energetycznej, będącej wskaźnikiem zastępowania określonej ilości paliw konwencjonalnych paliwami odnawialnymi, tzn. jakimi nakładami energii odnawialnej można zastąpić taką samą ilość energii zawartej w paliwach konwencjonalnych (FER i FES – rys. 2).

Końcowe „bilanse” efektywności energetycznej i sprawności pozyskiwania energii z biomasy (lub z jej udziałem, np. współspalanie) są uzależnione od „czynników” ilościowych i jakościowych, które można uszeregować następująco:

- wielkość uzyskiwanych plonów i (lub) ilość masy produktów ubocznych, dodatkowych i odpadowych, stanowiących biomasę oraz nakłady energetyczne na ich wytworzenie;
- skład chemiczny ze szczególnym uwzględnieniem zawartości wody (wilgotności), związanego węgla i części lotnych, popiołu i alkalii oraz, w przypadku niektórych technologii, zawartości lignin, celulozy i hemicelulozy;
- inne czynniki, jak nakłady oraz straty powodowane technologią zbioru, przewozu, wstępnego przechowywania i przygotowania (rozdrabnianie, skupianie) oraz wielkości (wydajności) zakładów wytwarzających energię z biomasy.

## Plony i nakłady różnych postaci i rodzajów energii na pozyskiwanie biomasy jako surowca energetycznego

Do głównych elementów oceny efektywności biomasy z upraw zalicza się czynniki ilościowe, w tym zwłaszcza produktywność (plon z jednostki powierzchni) i jakościowe (skład chemiczny surowca). Często dane o wielkości plonów roślin energetycznych, zwłaszcza nowych bądź introdukowanych z innych rejonów odmian, publikowane w literaturze, dotyczą wyników uzyskanych w doświadczeniach. W tych badaniach i doświadczeniach utrzymuje się założoną obsadę roślin, brak jest ścieżek i dróg technologicznych, a straty podczas zbioru są minimalizowane szczególnie starannością wykonania operacji. Równie często nie uwzględnia się zachwaszczenia, występującego w rzeczywistych warunkach produkcyjnych, szczególnie istotnego dla wieloletnich roślin energetycznych w początkowym okresie prowadzenia plantacji [BORKOWSKA i in. 2009]. Z tych wszystkich względów należy liczyć się z tym, że plony rzeczywiste są o 20–30% mniejsze od uzyskiwanych w doświadczeniach [BOEHMEL i in. 2008; BOERJESSON 1996; CHERNEY i in. 1991; CHOŁUJ i in. 2008; DUNNETT, SHAH 2007; DILTZ, JOHNSON 2011; FABER 2008; FAGERNÄS i in. 2006; FAZIO i in. 2011; KOŁODZIEJ, MATYKA (red.) 2012; KALTSCHMITT 2011; KOOP 2010; MAIN i in. 2007; MCLAUGHLIN, KSZOS 2005; ROSZKOWSKI 2009; 2012a, b; SZCZUKOWSKI (red.) 2012]. Potencjalna produktywność wieloletnich roślin energetycznych, zaliczanych do II generacji, takich jak np. proso różgowate, jest większa od plonowania roślin jednorocznych I generacji, w warunkach mniejszych nakładów energetycznych na wytworzenie plonu [Extension 2012; JANNASCH i in. 2001; SOKHANSANJ i in. 2009]. Rośliny te są przedmiotem intensywnych badań [TILMAN i in. 2006].

Wykorzystanie energii promieniowania Słońca przez rośliny uprawne waha się w granicach 3,0–3,4 g s.m.·m<sup>-2</sup>·dzień<sup>-1</sup>, co odpowiada efektywności energetycznej promieniowania Słońca w granicach 5,0–5,5%. Efektem wykorzystania energii promieniowania Słońca jest wzrost plonów średnio o 2,0 g s.m.·MJ<sup>-1</sup> (wahania 2,0–2,3 dla prosa różgowatego wg MADAKADZE i in. [1998]). Tempo przyrostu biomasy, a zatem i uzyskiwane plony, w istotnym stopniu zależą od efektywności przetwarzania energii promieniowania Słońca w danych warunkach agroklimatycznych. Proces fotosyntezy, polegający na przekształcaniu dwutlenku węgla i roztworów cukrów z udziałem energii promieniowania słonecznego, odbywa się przede wszystkim w liściach, skąd produkty przemiany są transportowane do kwiatostanów i korzeni, co także pochłania energię z promieniowania słonecznego. Wielkość plonów zależy od genotypu rośliny i jego dostosowania do warunków siedliskowych oraz stosowanej technologii produkcji i zbioru. Badania pięciu genotypów wierzby wykazały zróżnicowanie wskaźnika ulistowienia *LAI* (Leaf Area Index) od 66–92%, a plonów od 3,6 do 10 t·ha<sup>-1</sup> [KUŚ, MATYKA 2009; THARAKAN i in. 2008]. Większość badań wskazuje na związek uzyskiwanego plonu roślin z całkowitą wielkością fotosyntezy (intensywność i wielkość aparatu fotosyntezy, określanego wskaźnikiem *LAI*) i czasu trwania [CHOŁUJ i in. 2008]. Według tych autorów średnia wartość wskaźnika powierzchni *LAI* dla siedmiu popularnych gatunków roślin energetycznych wynosi ok. 3,0 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup> (stosunek powierzchni liści

do zajmowanej powierzchni pola) i zwiększa się w miarę wydłużania okresu użytkowania plantacji do 4–5 lat. Liście wielu roślin energetycznych cechują się istotnie większą zawartością popiołu niż pozostałe organy. Produktywność roślin jest silnie zróżnicowana typem fotosyntezy C3 lub C4. Rośliny typu C4 mają dodatkowy mechanizm wiązania CO<sub>2</sub> przez mechanizmy anatomiczne i fizjologiczne, dzięki czemu nie występuje faza fotorespiracji i tym samym zmniejszają się straty zasymilowanej energii (w warunkach względnie małych potrzeb wodnych) [GOŁASZEWSKI 2011]. Rośliny C4 są typowe dla obszarów tropikalnych lub zbliżonych i stanowią tylko ok. 5% flory. Rośliny o typie fotosyntezy C4, jak np. kukurydza, przetwarzają energię promieniowania Słońca ze sprawnością ok. 0,79%, tropikalne lasy palmowe 0,95%, a rośliny typu C3 (np. wierzba) osiągają wskaźnik 0,3–0,4%, a proso różgowe 0,22–0,56%.

Wielkość uzyskiwanych plonów suchej masy w rzeczywistych warunkach produkcyjnych zależy od częstotliwości zbioru biomasy (cykle roczne, 3–4-letnie i dłuższe w przypadku lasów przemysłowych – topola, akacja) i technologii zbioru. W pojęciu technologii zbioru biomasy na cele energetyczne, oprócz samej techniki zbioru, należy także uwzględnić termin zbioru (jesienny, wiosenny), ponieważ rośliny w okresie zimy tracą część zgromadzonej masy (różnice w plonach powodowane ilością zaschłych i opadłych liści mogą sięgać nawet 40% masy w przypadku rdestowca [CHOŁUJ i in. 2008]). Biomasa zebrana w terminach jesiennych zwykle cechuje się większą zawartością wody niż w okresach wiosennych. Zbiory w terminach wiosennych na ogół pozwalają uzyskać lepsze własności technologiczne biomasy (mniejsza zawartość wody), są natomiast trudniejsze technicznie (duża wilgotność wierzchnich warstw gleb). Tak duża liczba wariantów technologicznych, w warunkach jednoczesnej zmienności warunków siedliskowych, jest przyczyną bardzo istotnych różnic w uzyskiwanych plonach [BOEHMEL i in. 2008; DUNNETT i in. 2007; DILTZ, JOHNSON 2011; FABER 2008; FAZIO, MONTI 2011; MOONEY i in. 2012; MATYKA 2008; SZCZUKOWSKI (red.) 2012; WĘGRZYN, ZAJĄC 2008]. Przykładem tej zmienności są wahania plonów miskanta podawane w literaturze w granicach 4–44 t s.m.·ha<sup>-1</sup> [CHOŁUJ i in. 2008]. Średnie plony tej uprawy w rzeczywistych warunkach produkcyjnych UE wynoszą 10–12 t s.m.·ha<sup>-1</sup>, z wahaniami 6–15 t s.m.·ha<sup>-1</sup> [BOEHMEL i in. 2008; de WITT, FAAIJ 2010; FISCHER i in. 2010; KOPETZ i in. 2007]. W odniesieniu do roślin wieloletnich (ale nie tylko) istotną rolę odgrywa też wysokość koszenia. Koszenie trawy łąkowej (średni plon to 5,9 s.m.·ha<sup>-1</sup>) na wysokości 50 mm w porównaniu z koszeniem na wysokości 100 mm „zwiększa” ilość zbieranego plonu o ok. 20% [LAHTOMÄKI 2006]. Przeciętne wielkości nakładów energetycznych na pozyskanie biomasy na polu (uprawa, nawożenie, zbiór) w warunkach europejskich mieszczą się w granicach 4–7% plonu energii dla wierzby oraz słomy kukurydzy i zbóż, 7–12% dla traw wieloletnich i 15–40% dla roślin jednorocznych [BOERJESSON 1999; DAUGHERTY 2001; FINNAN 2010; MAIN i in. 2007; MOERSCHNER, GEROWITT 1998; PERSSON i in. 2011; SPITZER 2011]. W strukturze nakładów energetycznych ponoszonych na wytworzenie biomasy roślinnej największy udział mają zwykle nawozy (ok. 50%), maszyny (ok. 22%), paliwa (ok. 15%) i pestycydy (ok. 13%) [BRAUN i in. 2009]. Dzięki nawożeniu traw dawką 125 kg N·ha<sup>-1</sup> uzyskuje się 15 t

s.m. $\cdot$ ha<sup>-1</sup>. W skrajnym przypadku, np. uprawy mozgi trzcinowatej, nawożenie azotem w dawkach przekraczających 180 kg N $\cdot$ ha<sup>-1</sup> powoduje zerowy efekt energetyczny (nakłady równe plonowi energii). W nakładach energii powinno się także uwzględniać ochronę plantacji przed chorobami i szkodnikami, ale dobór i dawki preparatów są jeszcze w fazie badań [BORKOWSKA i in. 2009].

### Skład chemiczny surowców energetycznych

Biomasa jest mieszaniną materii organicznej i nieorganicznej, głównie celulozy (35–48%), hemicelulozy (22–30%) i ligniny (15–27%) oraz tłuszczów, białek, pektyn, skrobi, cukrów C5 i C6 i in. (tab. 3) [ECN 2012; MCKENDRY 2002].

Tabela 3. Zawartość ligniny i celulozy w wybranych biomasach

Table 3. Lignin and cellulose contents in selected biomasses

Wyszczególnienie Specification	Lignina Lignin	Celuloza Cellulose	Hemiceluloza Hemicellulose
	[% s.m. % d.m.]		
Drewno miękkie Softwood	22–30	35–40	25–30
Drewno twarde Hardwood	20–25	45–50	20–25
Słoma zbóż Cereal straw	15–20	33–40	20–25
Proso różgowate Millet	5–20	30–50	10–40

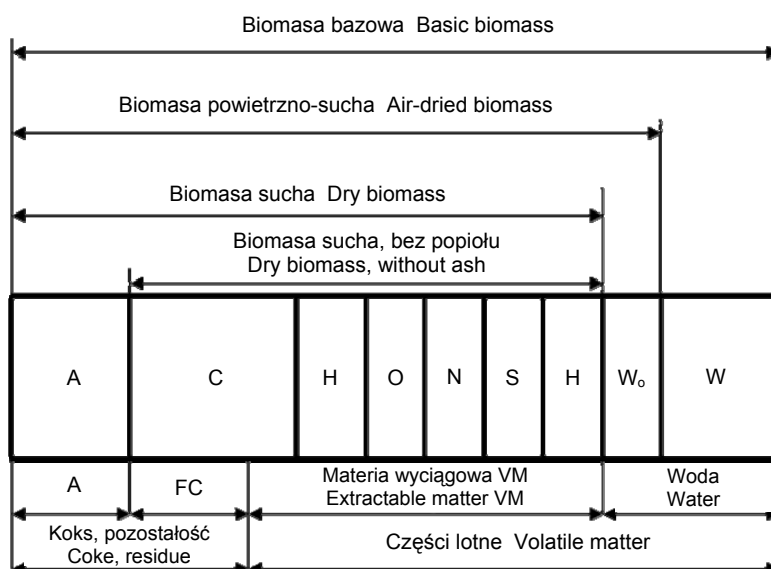
Źródło: opracowanie własne na podstawie: MCKENDRY [2002].

Source: own elaboration based on: MCKENDRY [2002].

W przypadku przetwarzania biomasy na energię za pomocą technologii termicznych (spalanie) pożądana jest maksymalizacja plonu ligniny. W odniesieniu do przemian biologicznych, korzystne jest uzyskiwanie maksymalizacji stosunku celulozy do hemicelulozy. Użycie biomasy o właściwych proporcjach (kompozycji) biochemicznej do produkcji bioetanolu umożliwia zwiększenie efektywności energetycznej o 30–40% [MCKENDRY 2002]. Struktura składu chemicznego (biochemicznego) (rys. 6) i skład chemiczny (biochemiczny) podstawowych rodzajów biomasy (tab. 4), wraz z rzeczywistą zawartością wody, decydują o wartości energetycznej biomasy oraz możliwości wykorzystania jej w określonej technologii.

Przeważająca ilość biomasy ok. 85% (75 Mt<sub>oe</sub>) jest w UE obecnie wykorzystywana jako źródło energii cieplnej, a z ok. 15% (15 Mt<sub>oe</sub>) wytwarzane są biopaliwa transportowe (ciekłe) [Eurostat 2012]. Teoretyczna zawartość energii w biomasie odpowiada jej ciepłu spalania. Ciepło spalania to całkowita ilość ciepła ze „spalenia” jednostki masy plonu, obejmująca ciepło utajone zawarte w parze wodnej spalin. Rzeczywista wartość energetyczna jest w przybliżeniu równa wartości opałowej. Wartość opałowa odpowiada ciepłu użytkowemu, które nie uwzględnia energii potrzebnej do odparowania wody i skroplenia pary wodnej zawartej w przetwarzanej biomasie i spalinach, a także energii niezbędnej do przekształcenia innych, dodatkowych składników biomasy w popiół. Ilość wody zawartej w biomasie w istotnym stopniu wpływa na jej wartość opałową. Energia cieplna ze spalania biomasy stałej, zwłaszcza drzewnej, jest zwykle opisywana ogólnym uproszczonym równaniem o postaci [DEMIRBAS 1997]:





Objaśnienia:

Analiza elementarna (Ultimate) C+H+O+N+S+W

Analiza techniczna (Proximate) VM+FC+W+A

VM – produkty bez wody, wydzielone z gazami (parami) według określonej metody, zależnie od biomasy, FC – węgiel związany, A – popiół.

Explanations:

Elementary analysis (Ultimate) C+H+O+N+S+W

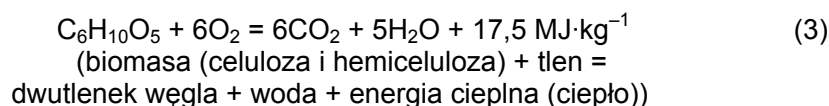
Technical analysis (Proximate) VM+FC+W+A

VM – products without water, emitted with gases (vapours) according to determined method, depending on the biomass, FC – bound carbon, A – ash.

Źródło: opracowanie własne na podstawie: ECN [2012]. Source: own elaboration based on: ECN [2012].

Rys. 6. Struktura składu chemicznego i biochemicznego biomasy

Fig. 6. The structure of chemical and biochemical biomass composition



Ciepło spalania (określane także mianem największej wartości cieplnej HHV – High Heating Value, High Value, Caloric Value) oblicza się na podstawie wyników badań analitycznych określających zawartość węgla, wodoru, tlenu, azotu i siarki (analiza elementarna, analiza pierwiastkowa, Ultimate Analysis) z zależności empirycznej ze współczynnikami obliczeniowymi o wielkościach nieznacznie zmieniających się wg różnych źródeł [BEDB 2012; DEMIRBAS 1997; 2008; ECN 2012]:

$$\text{HHV} = 0,34.C + 1,322.H - 0,12.O - 0,12.N + 0,0686.S - 0,0163.A \text{ [MJ}\cdot\text{kg}^{-1}] \text{ [ECN 2012]} \quad (4)$$

$$\text{HHV} = 0,35.C + 1,18.H - 0,10.O - 0,02.N + 0,10.S - 0,02.A \text{ [MJ}\cdot\text{kg}^{-1}] \text{ [ANSI 2012]}$$

Tabela 4. Skład biochemiczny wybranych biomas

Table 4. Biochemical composition of selected biomasses

Wyszczególnienie Specification	Analiza elementarna Elementary analysis				Analiza techniczna Technical analysis			LHV [MJ·kg <sup>-1</sup> ]
	węgiel carbon	wodór hydrogen	tlen oxygen	popiół ash	woda water	substancje wyciągowe extractable substances	węgiel związany bound carbon	
	[%]							
Drewno średnio Wood on average	51,6	6,3	41,5	0,1	20	82	17	18,6
Słoma zbóż Cereal straw	48,5	6	44	8,0	10	81	19	18,1
Słoma kukurydzy Maize straw	46	6	44	6	5,5	83	17	18,2
Miskant <i>Miscanthus</i>	48,1	5,4	42,2	2,8	28	82	18	18,5
Proso różgowe <i>Panicum virgatum</i>	50,6	6,1	44	6,3	12	84,3	16,7	17,8
Trawy różne Various grasses	50	5,8	44	44	27	82,3	17,7	18,4

Źródło: opracowanie własne na podstawie: ECN [2012]; MCKENDRY [2002] i inne dane literaturowe.  
Source: own elaboration based on: ECN [2012]; MCKENDRY [2002] and other data from the literature.

w których wielkości C, H, O, N i S są procentowym udziałem tych pierwiastków oraz popiołu A w suchej masie biomasy. Niekiedy w analizie elementarnej uwzględnia się także zawartość Cl, F i Br i innych składników. Skład chemiczny niektórych biomas, określony z wykorzystaniem wyników dotychczas przeprowadzonych analiz elementarnych i technicznych, znajduje się w bazach danych i innych źródłach [ECN 2012; VASSILEV i in. 2012a, b].

Wartość HHV odpowiada całkowitemu spalaniu badanej próbki do dwutlenku węgla i wody. W przypadku biomasy z olejów roślinnych i tłuszczów pochodzenia zwierzęcego, ze względu na ich odmienny skład chemiczny, wartość HHV można określić z zależności [DEMIRBAS 2008]:

$$\text{HHV} = 45,161 - 0,0687 \cdot W \text{ [MJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5)$$

gdzie:

W – procentowa zawartość wody w masie próbki biomasy.

Wartość opałową biomasy „suchej” wyznacza się zwykle na podstawie analizy pełnej (analiza techniczna) określającej zawartość substancji wyciągowych, węgla związanego, popiołu i wody. Analiza obejmuje spalanie próbki w temperaturze określonej procedurami (z uwagi na różną temperaturę topnienia popiołów 600–900°C). Według danych ANSI [2012], dokładność wyników analiz kalorymetrycznych wynosi 1,5%.

Zawartość substancji wyciągowych (lotnych, bezazotowych wyciągowych) oraz węgla związanego, którym w biomase jest zazwyczaj zasymilowany dwutlenek węgla, jest dość pewną informacją, dotyczącą przydatności biomasy do warunków spalania pirolitycznego. W rezultacie uzyskuje się wartość opałową netto LHV, związaną z wielkością HHV ogólną zależnością:

$$\text{LHV} = \text{HHV} - M_c \cdot t_w \quad (6)$$

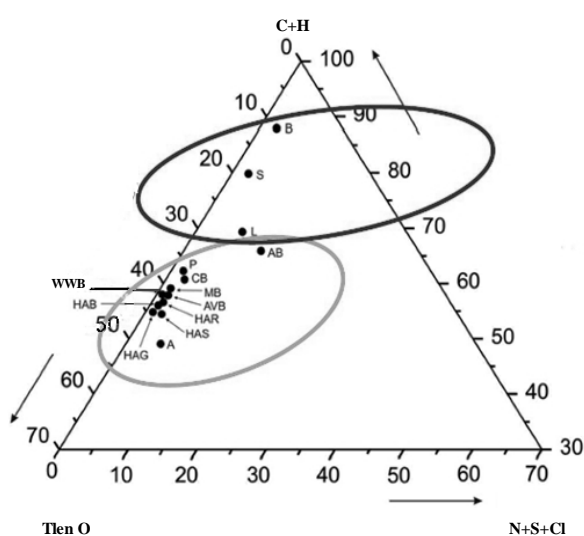
gdzie:

$M_c$  – masa wody uzyskanej z analizy próbki;

$t_w$  – ciepło ewaporacji tej wody, zależne głównie od zmian ciśnienia w otoczeniu.

Podczas termicznej konwersji biomasy następuje wydzielanie się gazów, wskutek czego zmienia się ciśnienie, a tym samym brak jest stałej wartości entalpii wody zawartej w biomase. Dlatego w praktyce częściej stosowana jest zależność o postaci:

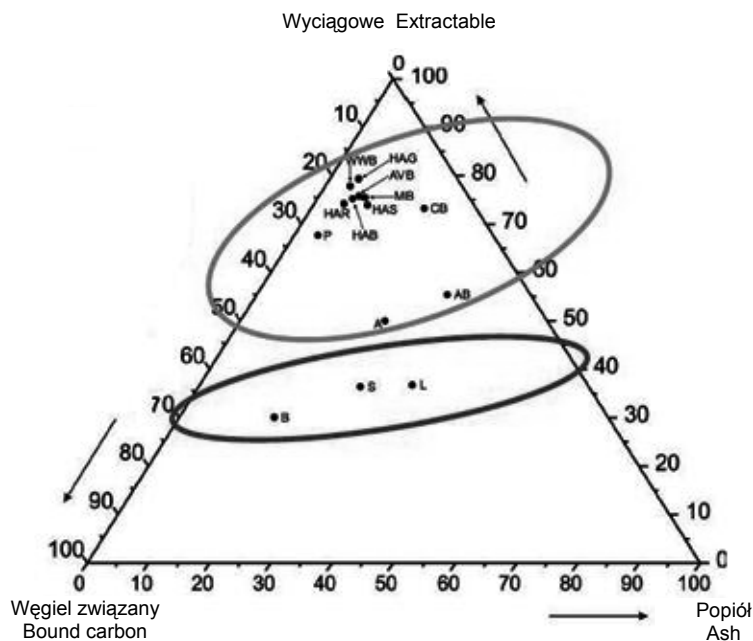
$$\text{LHV} = \text{HHV} - (2,766 \cdot W) [\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (7)$$



Źródło: opracowanie własne na podstawie: VASSILEV i in. [2012a].  
Source: own elaboration based on: VASSILEV et al. [2012a].

Rys. 7. Udział składników analizy chemicznej w różnych biomasach [%]; WWB – drewno i biomasa drzewna, HAB – biomasa roślinna, HAG – trawy, HAS – słoma, HAR – biomasa roślinna i odpady, AB – biomasa odzwierzęca, CB – biomasa skażona, AVB, MB – różne rodzaje biomasy, A – mikroalgi, algi, P – torf, L – węgiel brunatny, S – węgiel, B – węgiel bitumiczny

Fig. 7. Share of the chemical components in various biomasses [%]; WWB – wood and timber biomass, HAB – plant biomass, HAG – grasses, HAS – straw, HAR – plant biomass and wastes, AB – post-animal biomass, CB – contaminated biomass, AVB, MB – biomass of various kinds, A – micro-algae, algae, P – peat, L – brown coal, S – coal, B – bituminous coal



Źródło: opracowanie własne na podstawie: VASSILEV i in. [2012b].  
 Source: own elaboration based on: VASSILEV et al. [2012b].

Rys. 8. Udział składników analizy technicznej w różnych biomasach [%]; objaśnienia, jak pod rysunkiem 7.

Fig. 8. Share (%) of technical analysis compounds in various biomasses; explanations – see fig. 7

Wartość opałowa biomasy LHV nazywana jest czasem wartością opałową netto NHV i fizycznie odpowiada przekształceniu wodoru zawartego w próbce biomasy w fazę wodną (bez odzysku ciepła skraplania). Wyniki badań wskazują, że wahania LHV/HHV dla węgla wynoszą ok. 5%, dla gazu ziemnego ok. 10%, a dla większości rodzajów biomasy roślinnej 5–10% [VASSILEV i in. 2012a, b]. Rzeczywista zawartość wody w spalanej biomacie zmienia się w zależności od sposobu przechowywania (przygotowania) biomasy oraz niejednorodności jej składu chemicznego i wywiera decydujący wpływ na efektywność energetyczną procesów, zwłaszcza spalania biomasy.

W przypadkach wykorzystywania biomasy w procesach przemian anaerobowych (wytwarzanie biogazu) uproszczone określenie jej (biomasy) wartości energetycznej wymaga ustalenia zawartości węgla w suchej masie substratu. Przyjmuje się [BANKS 2011], że ok. 75% węgla zawartego w suchej masie substratu podlega przemianie w metan, z tego tylko ok. 58% może być wykorzystywane do „odbioru”, co odpowiada wskaźnikowi  $0,4 \text{ dm}^3 \text{ CH}_4 \cdot \text{g}^{-1}$  suchej masy substratu.

Z uwagi na zmienność rodzajów i stanów różnych biomas analityczne określenie ich składu chemicznego i wartości energetycznej następuje z dużymi trudnościami (przy-

kłady na rysunkach 7 i 8), wskutek czego dotychczas nie opracowano standaryzowanych norm i metod badawczych.

Drugim podstawowym elementem oceny przydatności energetycznej biomasy jest jej wilgotność w trakcie konwertowania na przydatne postaci formy energii lub jej nośniki, a nie w czasie zbioru czy przechowywania. Rzeczywista zawartość wody w konwertowanej biomacie zmienia się w zależności od sposobu przygotowania oraz przechowywania biomasy i wywiera decydujący wpływ na efektywność energetyczną procesów, zwłaszcza spalania. Sezonowanie (suszenie w warunkach naturalnych) biomasy z drzew i krzewów pozwala uzyskać 20-procentową przeciętną zawartość wody, ale jest to związane z ryzykiem wystąpienia niebezpieczeństwa korozji biologicznej (grzyby) i stratami suchej masy, w wyniku zmian biochemicznych, a także mechanicznych wskutek utraty (zaschnięciu) liści niektórych gatunków roślin.

## **Bibliografia**

AFCEE – Air Force Center for Engineering and the Environment 2012. Net Energy Ratio of Bio-fuels [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [www.afcec.af.mil/shared/media/document/AFD-100122-080.pdf](http://www.afcec.af.mil/shared/media/document/AFD-100122-080.pdf)

ANSI – American National Standards Institute 2012 [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [www.ansi.org](http://www.ansi.org)

BANKS C. 2011. Anaerobic digestion and energy [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [www.valorgas.soton.ac.uk/Pub\\_docs/JyU%20SS%202011/CB%204.pdf](http://www.valorgas.soton.ac.uk/Pub_docs/JyU%20SS%202011/CB%204.pdf)

BEDB – Biomass Energy Data Book 2012 [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: <http://cta.ornl.gov/bedb/download.shtml>

BLAKE A., SIMMONS B., LOQUE D., BLANCH H. 2008. Next-generation biomass feedstocks for bio-fuel production [online]. *Genome Biology*. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: <http://genomebiology.com/2008/9/12/242>

BOEHMEL C., LEWANDOWSKI L., CLAUPEIN W. 2008. Comparing annual and perennial energy cropping systems with different management intensities. *Agricultural Systems*. Vol. 96 s. 224–236.

BOERJESSON P.I. 1996. Energy analysis of biomass production and transportation. *Biomass Bio-energy*. Vol. 11 (4) s. 305–318.

BOERJESSON P.I. 1999. Environmental effects of energy crop cultivation in Sweden: Identification and quantification. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 16 s. 137–154.

BORKOWSKA H., MOLAS R., KUPCZ A. 2009. Virginia fanpetals (*Sida hermaphrodita* Rusby) cultivated on light soil; height of yield and biomass productivity. *Polish Journal of Environmental Studies*. Vol. 18. No. 4 s. 563–568.

BOYD J., CHRISTERSON L., DINKELBACH L. 2001. Energy from willow. Booklet published as part of the REgrow ALTENER II Programme of EC. Edynburg. Wydaw. SAC.

BRAUN R. 2007. Efficiency of energy crop digestion. W: Materials European Biogas Workshop [online]. Esbjerg. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [http://www.ramiran.net/doc07/Biogas III/Rudolf\\_Braun.pdf](http://www.ramiran.net/doc07/Biogas%20III/Rudolf_Braun.pdf)

BRAUN R., WEILAND P., WELLINGER A. 2009. Biogas from crop digestion. Task 37 – Energy from biogas and landfill gas [online]. IEA Bioenergy. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: <http://www.biogas.org.nz/Publications/Resources/biogas-from-energy-Crop-digestion.pdf>

- BRIDGWATER A. 2012. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 38 s. 68–94.
- BTC – Biomass Trade Centres 2012. Rośliny energetyczne na terenach rolnych. Raport Biomass Trade Centres [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [http://nuke.biomassradecenters.eu/Portals/O/SRC\\_Booklet\\_PL\\_POLBIOM\\_low.pdf](http://nuke.biomassradecenters.eu/Portals/O/SRC_Booklet_PL_POLBIOM_low.pdf)
- CAPROS P., MANTZAS L., TASIOS N., DEYITA A., KOUYARTAKIS N. 2010. EU energy trends to 2030 (up date 2009). Directoriat General for Energy. Bruksela. Directoriat General for Energy. ISBN 978-92-79-16191-9 ss. 180.
- CASTILLO A, PANOUTSOU C., BAUEN A. 2010. Report on biomass market segments within the transport, heat & electricity – CHP sectors for EU27 & Member States [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [www.biomassfutures.eu/work\\_packages/WP2\\_Demand](http://www.biomassfutures.eu/work_packages/WP2_Demand)
- CHALAMOŃSKI M., ŁUKASIEWICZ J., SZYMCZAK M. 2008. Suszenie osadów ściekowych. Instal. Nr 1 s. 48–53.
- CHERNEY J., JOHNSON K., YOLENEC J., GREENE D. 1991. Biomass potential of selected grass and legume crops. *Energy Sources*. Vol. 13 s. 283–292.
- CHOŁUJ D., PODLASKI S., WIŚNIEWSKI G., SZMALEC J. 2008. Kompleksowa ocena biologicznej przydatności 7 gatunków roślin wykorzystywanych na cele energetyczne. Uprawa roślin energetycznych a wykorzystanie rolniczej przestrzeni produkcyjnej w Polsce. *Studia i Raporty IUNG-PIB*. Nr 11 s. 81–89.
- CLARKE S., ENG P., PRETO F. 2011. Biomass densification for energy production [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/I-035.pdf](http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/I-035.pdf)
- CUNDIFF J., GRISSO R. 2008. Containerized handling to minimize hauling cost of herbaceous biomass. *Biomass Bioenergy*. Vol. 32 s. 308–313.
- CZYŻ H., DAWIDOWSKI B. 2005. Charakterystyka i wykorzystanie biomasy z upraw polowych jako źródła energii odnawialnej. *Energia Odnawialna*. Nr 1 s. 3–10.
- DAUGHERTY E. 2001. Biomass energy systems efficiency: analyzed through a Life Cycle Assessment Lund. Lund University ss. 39.
- DEMIRBAS A. 1997. Calculation of higher heating values of biomass fuels. *Fuel* 76 (5) s. 431–434.
- DEMIRBAS. A. 2008. Relationships derived from physical properties of vegetable oil and biodiesel fuels. *Fuel* 87 s. 1743–1748.
- DILTZ R., JOHNSON G. 2011. Sustainable land use for bioenergy in the 21st century *Industrial Biotechnology*. Vol. 7. No. 6 s. 436–447.
- DÖHLER H., PATERSON M., AMON T. 2011. Improvement of the technical, economical and ecological of biogas production – future challenges for the agricultural engineering sector [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [www.cloubofbologna.org/Proceeding](http://www.cloubofbologna.org/Proceeding)
- DUNNETT A., SHAH N. 2007. Prospects for bioenergy. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*. Vol. 1 s. 1–18.
- DRESZER K., MICHAŁEK R., ROSZKOWSKI A. 2003. *Energia odnawialna – możliwości jej pozyskiwania i wykorzystania w rolnictwie*. Kraków, Lublin, Warszawa. Wydaw. PTIR. ISBN: 83-917053-0-7 ss. 256.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE. Dz.Urz. UE L140/16.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/27/UE z dnia 25 października 2012 r. w sprawie efektywności energetycznej, uchylająca dyrektywę 2006/32/WE z dnia 5 kwietnia 2006 r. w sprawie końcowego wykorzystania energii i usług energetycznych. Dz.Urz. UE L 315/1.

- ECN – Energy Research Centre of the Netherlands 2012. Phyllis, database [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [www.ecn.nl/phyllis](http://www.ecn.nl/phyllis)
- EEA – European Environment Agency 2007. Estimating the environmentally compatible bioenergy potential from agriculture [online]. Technical Report No. 12. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: <http://www.eea.europa.eu/enquiries>
- EUROSTAT 2010, 2011. Database [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/european\\_business/data/database](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/european_business/data/database)
- Extension 2012. Switchgrass (*Panicum virgatum*) for Biofuel Production [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [www.extension.org/pages/26635/switchgrass-panicum-virgatum-for-biofuel-production](http://www.extension.org/pages/26635/switchgrass-panicum-virgatum-for-biofuel-production)
- FABER A. 2008. Przyrodnicze skutki uprawy roślin energetycznych. Uprawa roślin energetycznych a wykorzystanie rolniczej przestrzeni produkcyjnej w Polsce. Studia i Raporty. IUNG-PIB. Nr 11 s. 43–53.
- FAGERNÄS L., JOHANSSON A., WILÉN C., SIPILÄ K., MÄKINEN T., HELYNEN S., DAUGHERTY E., den Uil H., YEHLow J., KABERGER T., ROGULSKA M. 2006. Bioenergy in Europe – opportunities and barriers bioenergy. NoE. Helsinki. VTT. ISBN 951-38-6815-X ss. 118.
- FAZIO S., MONTI A. 2011. Life cycle assessment of different bioenergy production systems including perennial and annual crops. Biomass and Bioenergy. Vol. 35 s. 4868–4878.
- FINNAN J. 2010. Harvesting energy crops [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [www.teagasc.ie/publications](http://www.teagasc.ie/publications)
- FISCHER G., PRIELER S., van VELDHUIZEN H., LENSINK S.M., LONDO M., de WIT M. 2010a. Biofuel production potentials in Europe: Sustainable use of cultivated land and pastures. Part 1: Land productivity potentials. Biomass and Bioenergy. Vol. 34 s. 159–172.
- FISCHER G., PRIELER S., van VELDHUIZEN H., LENSINK S.M., LONDO M., de WIT M. 2010b. Biofuel production potentials in Europe: Sustainable use of cultivated land and pastures. Part 2: Land productivity. Biomass and Bioenergy. Vol. 34 s. 173–187.
- FRĄCZEK J. (red.) 2010. Produkcja biomasy na cele energetyczne. Kraków. Wydaw. PTIR ss. 202.
- FREIERMUTH-KNUCHEL R., KÄGI T., GAILLARD G., HÖLSCHER TH., MÜLLER-SÄMANN K., DEIMLING S. 2007. LCA of energy crops from the perspective of multi functional agriculture [online]. Life Cycle Management Conference. Zurych. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [www.lcm2007.org/Presentation/TU\\_3.05-Freiermuth.pdf](http://www.lcm2007.org/Presentation/TU_3.05-Freiermuth.pdf)
- GOŁASZEWSKI J. 2011. Wykorzystanie substratów pochodzenia rolniczego w biogazowniach w Polsce. Postępy Nauk Rolniczych. Nr 2 s. 69–94.
- GOŁĘBIEWSKA U. (red.) 2009. Odnawialne źródła energii – technologia, legislacja, ekonomika. Koszalin. Wydaw. EKSPERT-SITR. ISBN: 978-83-923087-9-9 ss. 267.
- GRZYBEK A. (red.) 2010. Modele energetycznego wykorzystania biomasy. Falenty-Warszawa. Wydaw. ITP. ISBN 978-83-62416-08-0 ss. 230.
- HELLER M., KEOLEIAN G., VOLK T. 2003. Life Cycle Assessment of a willow bioenergy cropping system. Biomass and Bioenergy. No. 2 s.147–165.
- HERMANN W., BOSSHARD P., HUNG E., HUNT R., SIMON A.J. 2005. An assessment of carbon capture technology and research opportunities GCEP energy assessment analysis [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: <http://gcep.stanford.edu>
- HUANG W.D., ZHANG Y.H.P. 2011. Energy efficiency analysis: biomass-to-wheel efficiency related with biofuels production, fuel distribution, and power train systems [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0022113](http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0022113)

- HUGUEN P., Le SAUX G. 2010. Perspectives for a European standard on biomethane [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [www.biogasmax.eu](http://www.biogasmax.eu)
- HUOPANA H. 2011. Energy efficient model for biogas production in farm scale. University of Jyväskylä ss. 89.
- IEA BIOENERGY 2007. Task 33: Thermal Gasification of Biomass. Presentation to ExCo 59 in Golden. 25–27 kwietnia 2007 r.
- IEA – International Energy Agency 2007. Energy technology essentials. Biomass for power generation and CHP is ethanol energy-efficient? [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [http://journeytoforever.org/ethanol\\_energy.html](http://journeytoforever.org/ethanol_energy.html)
- IEA – International Energy Agency: World Energy Outlook: 2009, 2010, 2011. Paryż.
- ISO 2006. Zarządzanie środowiskowe – ocena cyklu życia – wymagania i wytyczne. Norma PN–EN ISO 14044.
- JANNASCH R., QUAN Y., SAMSON R. 2001. A process and energy analysis of palletizing switchgrass. Final Report [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [www.reap-canada.com/online\\_library/feedstock\\_biomass](http://www.reap-canada.com/online_library/feedstock_biomass)
- JARADAT A. 2010. Genetic resources of energy crops: Biological systems to combat climate change [online]. Australian Journal of Crop Science. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [www.readperiodicals.com/201007/2089531911.html#ixzz24fJ1ZWRW](http://www.readperiodicals.com/201007/2089531911.html#ixzz24fJ1ZWRW)
- JUDY A., LIBRA J.A., KYOUNG S.R.O., KAMMANN C., FUNKE A., BERGE N., NEUBAVER Y., TITRICI M.M., FÜHNER CH., BENS O., KERN J., EMMERICH K.M. 2011. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*. Vol. 2(1) s. 89–124.
- KALTSCHMITT M., HARTMANN H., HOFBAUER H. 2009. *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Berlin, Heidelberg. Springer. ISBN 978-3-540-85094-6.
- KALTSCHMITT M. 2011. Biomass for energy in Germany-status, perspectives and lessons learned. *Journal of Sustainable Energy & Environment*. Special Issue s. 1–10.
- KEOLEIAN G.A., YOLK T.A. 2005. Renewable energy from willow biomass crops: life cycle energy, environmental and economic performance. *Critical Reviews in Plant Sciences*. Vol. 24 s. 385–406.
- KAVALOV B., PETEVES S.D. 2005. Status and perspectives of biomass-to-liquid fuels in the European Union (Report EUR 21745 EN) [online]. European Commission, Joint Research Centre. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [www.virtualmaze.com/sample/Biofuels%20Info/Rhombus%20Power%20-%20biodiesel/EUR%2021745%20EN.pdf](http://www.virtualmaze.com/sample/Biofuels%20Info/Rhombus%20Power%20-%20biodiesel/EUR%2021745%20EN.pdf)
- KOŁODZIEJ B., MATYKA M. (red.) 2012. *Odnawialne źródła energii – rolnicze surowce energetyczne*. Poznań. PWRiL. ISBN 978–83–09–01139–2 ss. 594.
- KOMOROWICZ M., WRÓBLEWSKA H., PAWŁOWSKI J. 2009. Skład chemiczny i właściwości energetyczne biomasy. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*. Nr 40 s. 402–410.
- KOOP K., KOPER M., BLJSMA R., WONINK S., OUWENS J.D. 2010. Evaluation of improvements in end-conversion efficiency for bioenergy production. Bruksela. Wydaw. ECOFYS ss. 135.
- KOPETZ H., JOSSART J.M., RAGOSSNIG H., METSCHINA C. 2007. *European Biomass Statistics*. Bruksela. European Biomass Association (AEBIOM) ss. 73.
- KOZLOVA L. 2006. Oszczędności energetyczne uprawy roślin w płodozmianie. W: *Materiały XII Międzynarodowego Sympozjum „Ekologiczne aspekty mechanizacji produkcji roślinnej”*. Warszawa. SGGW s. 118–122.
- KRASUSKA E., ROSENQVIST H. 2012. Economics of energy crops in Poland today and in the future. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 38 s. 23–33.



- KUŚ J., MATYKA M. 2009. Wydajność wybranych gatunków roślin uprawianych na cele energetyczne w zależności od jakości gleby. *Fragmenta Agronomica*. Vol. 26(4) s. 103–110.
- LAHTOMÄKI A. 2006. Biogas production from energy crops and crop residues. University of Jyväskylä. ISBN 951–39–2559–5 ss. 91.
- LEWANDOWSKI W., RYMS M., MELER P. 2010. Termiczno-chemiczna piroliza do biopaliw ciekłych i gazowych, jako metoda podnoszenia sprawności konwersji energii biomasy. *Nafta Gaz*. Nr 8 s. 675–680.
- MADAKADZE L., STEWART K., PETERSON P., COULMAN B., SAMSON R., SMITH L. 1998. Light interception, use-efficiency and energy yield of switch grass grown in a short season area. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 5 s. 475–482.
- MAIN M., JOSEPH S., HANG Y., MACLEAN H. 2007. Assessing the energy potential of agricultural bioenergy pathways for Canada. *Canadian Journal of Plant Science*. Vol. 87 s. 781–792.
- MANTAU U. (red.) 2010. EUwood – real potential for changes in growth and use of EU forests [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [http://ec.europa.eu/energy/renewables/studies/doc/bioenergy/euwood\\_final\\_report.pdf](http://ec.europa.eu/energy/renewables/studies/doc/bioenergy/euwood_final_report.pdf)
- MATYKA M. 2008. Opłacalność i konkurencyjność produkcji wybranych roślin energetycznych. *Studia i Raporty IUNG-PIB*. Nr 11 s. 113–123.
- MCLAUGHLIN S., KSZOS L. 2005. Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 28 s. 515–535.
- MCKENDRY P. 2002. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass Bioresource Technology. Vol. 83 s. 37–46.
- Ministerstwo Gospodarki 2012. Projekt ustawy o OZE z dnia 26 lipca 2012 r.
- MOERSCHNER J., GEROWITT B. 1998. Energiebilanzen von Raps bei unterschiedlichen Anbauintensitäten. *Landtechnik*. Nr 53 s. 384–385.
- MOONEY D., LARSON J., ENGLISH B., TYLER D. 2012. Effect of dry matter loss on profitability of outdoor storage of switchgrass. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 44 s. 33–41.
- MURSEC B., VINDIS P., JANZEKOVIC M., BRUS M., CUS F. 2009. Analysis of different substrates for processing into biogas. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. Vol. 37 s. 652–659.
- Nexant ChemSystems 2007. Liquid biofuels: substituting for petroleum [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [www.chemsystems.com/reports/search/docs/prospectus/MC\\_Biofuels\\_Pros.pdf](http://www.chemsystems.com/reports/search/docs/prospectus/MC_Biofuels_Pros.pdf)
- NIGAM P.S., SINGH A. 2011. Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in Energy and Combustion Science*. Vol. 37. Iss. 1 s. 52–68.
- PERSSON T., ORTIZ B., BRANSBY D., WU W., HOOGENBOOM G. 2011. Determining the impact of climate and soil variability on switchgrass production in the south-eastern USA; a simulation study. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. doi:10.1002/bbb.288
- PICAZO-ESPINOSA R., GONZALEZ-LÓPEZ J., MANZANERA M. 2011. Bioresources for third-generation biofuels. *Biofuel's Engineering Process Technology*. Wiedeń. M.A. dosSantos – Bernardes s. 16–133.
- PRINS M.J. 2005. Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: <http://alexandria.tue.nl/extra2/200510705.pdf>
- RASCHKA A., CARUS M. 2012. Industrial material use of biomass – basic data for Germany, Europe and the world [online]. Nova-Institute for ecology and innovation. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [www.nova-institut.de](http://www.nova-institut.de)

- ROSZKOWSKI A. 2009. Bioenergia – pola i lasy zastąpią węgiel, ropę i gaz? Inżynieria Rolnicza. Nr 1(110) s. 243–257.
- ROSZKOWSKI A. 2012a. Biomasa i bioenergia – bariery technologiczne i energetyczne. Problemy Inżynierii Rolniczej. Nr 3 s. 79–100.
- ROSZKOWSKI A. 2012b. Biodiesel w UE i Polsce – obecne uwarunkowania i perspektywy. Problemy Inżynierii Rolniczej. Nr 3 s. 65–78.
- RUVIARO C., GIANEZINI M., BRANDÃO F., WINCK C., DEWES H. 2012. Life cycle assessment in Brazilian agriculture facing worldwide trends. Journal of Cleaner Production. Vol. 28 s. 9–24.
- de SCHAMPHELAIRE L., YERSTRAETE W. 2009. Revival of the biological sunlight-to-biogas energy [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com). DOI 10.1002/bit.22257
- SMEETS E., FAAIJ A. 2007. Bioenergy potentials from forestry in 2050. Climatic Change. Vol. 81 s. 353–390.
- SMUSZ R. 2010. Efektywność wykorzystania energii w Polsce [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [pae.org.pl/ee\\_konferencja/pdf/04\\_robert\\_smusz.pdf](http://pae.org.pl/ee_konferencja/pdf/04_robert_smusz.pdf)
- SOKHANSANJ S., MANI S., TURHOLLOW A., KUMAR A., BRABSBY D., LYND L., LASER M. 2009. Large-scale production, harvest and logistics of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) – current technology and envisioning a mature technology. Biofuels, Bioproducts Biorefining. Vol. 3 s. 124–141.
- SPITZER J. 2011. Biofuels and Biomass Power. IEA Bioenergy [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [www.iea.org/work/2011/egrday/Spitzer.pdf](http://www.iea.org/work/2011/egrday/Spitzer.pdf)
- STRAŠIL Z., KÁRA J. 2010. Study of knotweed (*Reynoutria*) as possible phytomass resource for energy and industrial utilization. Research of Agricultural Engineering. No. 56 s. 85–91.
- SZCZUKOWSKI S. (red.) 2012. Wieloletnie rośliny energetyczne. Warszawa. Wydaw. Multico. ISBN 978–83–7763–051–8 ss.156.
- THARAKAN J., VOLK T., NOWAK C., OFEZU G. 2008. Canopy structure, light interception, and light-use efficiency in willow [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [http://nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr\\_nrs-p-31/59tharakan-p-31.pdf](http://nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr_nrs-p-31/59tharakan-p-31.pdf)
- TILMAN D., HILL J., LEHMAN C. 2006. Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass. Science Vol. 314. Iss. 1598. DOI: 10.1126/science.1133306.
- Ustawa z dnia 15 kwietnia 2011 r. o efektywności energetycznej. Dz.U. 2011. Nr 94 poz. 551.
- VASSILEV S., BAXTER D., ANDERSEN L., VASSILEVA CH., MORGAN J. 2012a. An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. Fuel. Vol. 94 s. 1–33.
- VASSILEV S., BAXTER D., ANDERSEN L., VASSILEVA CH., MORGAN J. 2012b. An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. Fuel. Vol. 89 s. 913–933.
- WĘGRZYN A., ZAJĄC G. 2008. Wybrane aspekty badań efektywności energetycznej technologii produkcji biomasy roślinnej. Acta Agrophysica. Vol. 11(3) s. 799–806.
- de WITT M., FAAIJ A. 2010. European biomass resource potential and costs. Biomass and Bioenergy. Vol. 34 s. 188–202.
- WITZKE H.P., BANSE M., GOMANN H., HECKELEI T., BREVERT T., MANN S., KEMPEN M., ADENÄUER M., ZINTL A., PÉREZ DOMINGUEZ I., MÖLLER M. 2008. Modelling of energy-crops in agricultural sector models – a review of existing methodologies [online]. [Dostęp 09.11.2012]. Dostępny w Internecie: [www.jrc.ec.europa.eu](http://www.jrc.ec.europa.eu)

**Andrzej Roszkowski**

**ENERGY FROM BIOMASS – EFFECTIVENESS, EFFICIENCY  
AND ENERGETIC USABILITY  
PART 1**

**Summary**

The study reviewed and analysed factors deciding on the energetic effectiveness of different biomass kinds. Objective difficulties were showed as resulted from diversification of biomass definition and classification, lack of fixed analytical methods to determine its features qualifying and quantifying the usability, conditions and limitations of use in main technologies of gaining the energy from biomass (or with its share). Biomass of the forest and agricultural origin was considered (such as the energy crops, products of main, additional and residuary character, plant and animal fats, substrates for biogas generation, etc.). Dependence of energetic effectiveness indices on the following factors was revealed: crop yields under real conditions, technology of gaining biomass, energy inputs on necessary auxiliary technological operations and obtained efficiency of the conversion into particular forms of energy. Increasing demand, especially for electric energy and transport fuels (named also as the liquid biomass), results in a tendency to using different resources of renewable energy, biomass inclusive, what does not always fulfill the requirements of positive energetic effectiveness, environment protection and food production. Limitations in gaining the energy from biomass make necessary the modifications of legal and economic regulations, valid either in the EU and Poland. Extortion of energy crop cultivation on the areas of limited usability to food production shall probably cause a drop of crop yielding from 10–12 t·ha<sup>-1</sup>, down to 3–10 t·ha<sup>-1</sup>. The most “sure” kind of bioenergy seems to be the gas, gained by processing of organic wastes, sewage sludges, landfill sites and other biological sources, because of their environmental nuisance, and not for achieving direct energetic benefits. The influence of basic technological and other factors on the effectiveness and efficiency of gaining the energy from biomass will be discussed in the II-nd part of this study.

**Key words:** technological, natural and economic barriers, biofuels, bioenergy, biomass, heat, effectiveness, electric energy, conversion efficiency

Adres do korespondencji

prof. dr hab. Andrzej Roszkowski  
Instytut Technologiczno-Przyrodniczy  
Oddział w Warszawie  
ul. Rakowiecka 32, 02-532 Warszawa  
tel. 22 542-11-77; e-mail: a.roszkowski@itep.edu.pl

