

135/2001 AOG/4

Raport Badawczy

RB/88/2001

Research Report

**Problemy uprawy
i przetwarzania biomasy jako
alternatywnego źródła
bioenergii**

W. Ciechanowicz, Z. Uhrynowski

**Instytut Badań Systemowych
Polska Akademia Nauk**

**Systems Research Institute
Polish Academy of Sciences**



POLSKA AKADEMIA NAUK

Instytut Badań Systemowych

ul. Newelska 6

01-447 Warszawa

tel.: (+48) (22) 8373578

fax: (+48) (22) 8372772

Pracę zgłosił: dr inż. Piotr Holnicki

Warszawa 2001

Problemy uprawy i przetwarzania biomasy jako alternatywnego źródła bioenergii

W. Ciechanowicz,
Z. Uhrynowski

Wprowadzenie

Paliwa kopalne: ropa, węgiel i gaz - są głównymi udziałowcami w ocieplaniu globalnym kuli ziemskiej. Zagroża to w różny sposób rolnictwo i innym formom działalności ludzkiej. Zdaniem ekspertów, zasoby paliw kopalnych w ciągu 40-50 lat ulegną wyczerpaniu. Oznacza to, że poszukiwanie alternatywnych źródeł energii jest wyjątkowo pilne. Jednym z nich może być **bioenergia** wykorzystująca biomasę jako pierwotny nośnik energii.

Bioenergia jest to odpowiednio przetworzona energia biomasy, rozumianej jako organiczna materia powstała w wyniku asymilacji dwutlenku węgla zawartego w atmosferze. Biomasa może być przemieniana bezpośrednio lub pośrednio w energię elektryczną, paliwa ciekła lub gazowe.

Wprowadzanie nowych technologii zawsze wiąże się z pewnym niebezpieczeństwem: nigdy do końca nie wiadomo jakie będą ich skutki - dla człowieka i środowiska, doraźne lub w długim okresie czasu, lokalne i globalne, w małej i wielkiej skali.

Wydaje się, że najmniejsze ryzyko w podejmowaniu decyzji odnośnie rozwoju technologii zaspakajania ludzkości w nośniki energii będzie dotyczyło tych technologii, które będą naśladować mechanizmy stworzone przez naturę. Które, jako elementy biogeochemicznego cyklu węglowego, będą wkomponowane w stworzone przez naturę mechanizmy ekosystemu globu ziemskiego. Jednym z takich elementów są rośliny jako organizmy producentów w cyklu węglowym.

1 Biomasa

1.1 Informacje ogólne o uprawie biomasy

Co to jest biomasa ?

Biomasę stanowią: drzewa, trawy, w tym lucerna, rośliny uprawne takie jak zboże i okopowe. Biomasa jest formą gromadzenia energii słonecznej jako produkt fotosyntezy, a więc procesu, w wyniku którego rośliny produkują węglowodany z dwutlenku węgla zawartego w atmosferze i wody w obecności promieniowania słonecznego.

Węglowodany stanowią istotne dla życia biologicznego chemiczne związki organiczne, w skład których wchodzi: węgiel, wodór i tlen. Wśród węglowodanów rozróżnia się:

- celulozę, hemicelulozę i ligninę stanowiące materię organiczną drzew,
- cukry i skrobię, będące podstawowymi składnikami upraw konsumpcyjnych.

Celuloza, jako włókniste węglowodany, tworzy podstawowy zrąb ściany komórkowej. Hemiceluloza stanowi około jedną czwartą substancji zdrewniałych tkanek roślinnych. Lignina, występująca w zdrewniałych tkankach roślin, zwiększa wytrzyma-

łość mechaniczną i chemiczną ścian celulozowych. Znanymi cukrami występującymi w roślinach są sacharydy i glukoza.

W niniejszej pracy **biomasa**, pozyskiwana w postaci odpowiednich gatunków wierzby będących efektem modyfikacji genetycznych, będzie rozważana głównie jako **surowiec energetyczny**, którego uprawa może mieć nieograniczony rynek zbytu, a także może tworzyć wiele miejsc pracy na obszarach wiejskich. Czyni się to dlatego, że tylko biomasa uprawiana jako podstawowa produkcja rolna może zapewnić ciągłość dostawy surowca energetycznego o określonej wartości opałowej. Są to podstawowe wymagania odbiorcy biomasy. Nie mogą tych warunków spełniać ani słoma ani odpady leśne ani inne źródła odnawialne.

Czynniki decydujące o tym, które rośliny uprawne lub drzewa mogą być wykorzystywane do celów energetycznych

Są to trzy podstawowe czynniki:

- stosunek energii zawartej w biomase do energii potrzebnej na jej uprawę i pozyskanie,
- zdolność gromadzenia energii słonecznej w postaci biomasy,
- rodzaj biomasy ze względu na sprawność przetwarzania na paliwa ciekłe i gazowe, która zależy między innymi od tego, czy materię organiczną rośliny tworzy celuloza, a więc przetwarzana chemicznie lub cukry, które są przetwarzane biologicznie.

Rośliny o najkorzystniejszym stosunku energii wyjściowej do wejściowej

Dla oceny wydajności energetycznej roślin mogących stanowić biomasę wykorzystywaną do celów energetycznych badano tradycyjne uprawy spożywcze, takie jak zboża, buraki cukrowe i inne okopowe, lucernę, trawy, trzcinę, rośliny przeznaczone na cele energetyczne jak krótkookresową uprawę wierzby typu salix, pozostałości upraw rolnych i leśnych. W pracy [1] zamieszczono oceny wydajności energetycznej dla stanu obecnego wybranych upraw i przewidywane dla 2015 roku.

W tablicach 1 i 2 podano odpowiednio: wydajność energetyczną, wielkość zbiorów w tonach i jednostkach energetycznych dla wybranych upraw roślinnych oraz wzrost procentowy wydajności wybranych upraw w Szwecji dla okresów: 1971-1989, 1990-2000 i przewidywanych w okresie 1995-2000.

Tablica 1. Wydajność energetyczna, wielkość zbiorów w tonach i jednostkach energetycznych dla wybranych upraw roślinnych [1]

| Rodzaj uprawy | Rok | Wydajność energetyczna GJ/t | Zbiory w tonach t/ha | Zbiory w jednostkach energetycznych GJ/ha |
|-------------------|------|-----------------------------|----------------------|---|
| pszenica (ziarno) | 1998 | 18.5 | 5.1 | 94 |
| | 2015 | | 7.5 | 140 |
| rzepak (nasiona) | 1998 | 27.8 | 2.5 | 70 |
| | 2015 | | 3.1 | 86 |
| ziemniaki | 1998 | 17.0 | 7.7 | 130 |
| | 2015 | | 10.0 | 180 |
| buraki cukrowe | 1998 | 17.4 | 11.0 | 190 |
| | 2015 | | 14.0 | 240 |
| lucerna | 1998 | 19.0 | 8.0 | 150 |
| | 2015 | | 14.0 | 270 |
| wierzba salix | 1998 | 19.5 | 9.3 | 180 |
| | 2015 | | 17.0 | 330 |

Rozważano zużycie energii jako paliwo silnikowe zużywane podczas upraw, wymagane dla wyprodukowania nasion, nawozów sztucznych, środków ochrony roślin i w czasie transportu różnymi środkami transportu. W tabelicy 3 podano wyniki przeprowadzonych analiz, z których wnioskuje się, że najkorzystniejszymi uprawami ze względu na relacje energii wejściowej, zawartej w biomase jako w nośniku energii, do energii wejściowej, wymaganej dla produkcji biomasy, charakteryzują się uprawy wieloroczne, jak lucerna i wierzba, a nie uprawy jednoroczne jak pszenica i inne uprawy siewne.

Tablica 2. Wzrost procentowy wydajności wybranych upraw w Szwecji dla okresów 1971-1989, 1990-2000 i przewidywanych w okresie 1995-2000 [1]

| Rodzaj uprawy | Wzrost wydajności upraw siewnych w latach 1971-1989 | Wzrost wydajności upraw energetycznych w latach 1971-1989 | Wzrost wydajności upraw energetycznych w latach 1995-2015 |
|-------------------|---|---|---|
| pszenica (ziarna) | 2.3 | 3-5 | 2.0 |
| rzepak (nasiona) | 0.2 | 2-3 | 1.0 |
| ziemniaki | 0.7 | 3-4 | 1.5 |
| buraki cukrowe | 0.8 | 1-2 | 1.0 |
| lucerna | - | 5-6 | 3.0 |
| wierzba salix | - | 5-7 | 3.0 |

Tablica 3. Wybrane wyniki przeprowadzonych analiz [1]

| Rodzaj uprawy | Rok | Wydajność energetyczna GJ/ha rok | Energia wejściowa uprawy GJ/ha rok | Wydajność energetyczna/energia wejściowa |
|---------------------------|------|----------------------------------|------------------------------------|--|
| pszenica (ziarno) | 1998 | 94 | 18.0 | 5.2 |
| | 2015 | 140 | 14.8 (20.0) | 9.4 (7.0) |
| pszenica (ziarno + słoma) | 1998 | 130 | 19.5 | 6.7 |
| | 2015 | 176 | 16.0 (21.6) | 11.0 (8.2) |
| rzepak (nasiona) | 1998 | 70 | 15.8 | 4.4 |
| | 2015 | 86 | 12.1 (17.0) | 7.1 (5.1) |
| rzepak (nasiona + słoma) | 1998 | 106 | 17.2 | 6.2 |
| | 2015 | 122 | 13.2 (18.5) | 9.2 (6.6) |
| ziemniaki | 1998 | 130 | 43.4 | 3.0 |
| | 2015 | 180 | 39.2 (53.5) | 4.6 (3.4) |
| buraki cukrowe | 1998 | 190 | 27.0 | 7.0 |
| | 2015 | 240 | 23.5 (33.4) | 10.0 (7.2) |
| lucerna | 1998 | 150 | 10.5 | 14 |
| | 2015 | 270 | 12.5 (17.8) | 22 (15) |
| wierzba salix | 1998 | 180 | 8.4 | 21 |
| | 2015 | 330 | 9.1 (12.1) | 36 (26) |

* Liczby nie ujęte w nawiasy dotyczą przypadku, gdy energię wejściową stanowią paliwa kopalne, a liczby ujęte w nawiasy obejmują zaś sytuację, gdy energię wejściową stanowią pochodne biomasy.

Rośliny posiadające największą zdolność gromadzenia energii słonecznej w postaci biomasy

Oczywiste jest, że tylko te rośliny mogą być wykorzystywane jako nośniki energii, które posiadają największą zdolność gromadzenia energii słonecznej w postaci biomasy, a więc zdolność asymilacji poprzez fotosyntezę węgla zawartego w dwutlenku węgla.

Fotosynteza jest sposobem przekazywania energii pomiędzy przyrodą nieożywioną a ożywioną. Jest ona złożonym procesem wytwarzania związków organicznych z dwutlenku węgla i wody kosztem energii światła słonecznego. Fotosynteza przebiega w dwóch etapach, z których każdy składa się z wielu procesów pośrednich. Pierwszym etapem jest fotoliza, rozkład wody na wodór i tlen pod wpływem światła, i wydzielanie wolnego tlenu. W drugim etapie, nie wymagającym światła, następuje rozkład dwutlen-

ku węgla, któremu towarzyszy także wydzielanie wolnego tlenu. Zachodzi asymilacja węgla zawartego w dwutlenku węgla i w wyniku tego powstaje roślinna substancja organiczna. Proces wydzielania się wolnego tlenu stanowi niejako proces oddychania roślin, określane mianem *respiracji*.

Istotnym elementem w procesie fotosyntezy są *chloroplasty* (zielone ciała komórek roślinnych) występujące w zielonych, oświetlonych częściach rośliny, a więc w liściach. Ich zadaniem jest pochłanianie energii światła i jej przekształcanie w energię chemiczną, zużywaną w procesie fotolizy. Uogólniając zagadnienie można powiedzieć, że w procesie fotosyntezy ma się do czynienia z przejmowaniem energii promieniowania słonecznego przez chloroplasty i jej gromadzeniem w postaci energii wiązań chemicznych poprzez redukcję dwutlenku węgla do molekuł węglowodanów, lipidów (tłuszczowców) i protein.

Na zdolność gromadzenia energii słonecznej w postaci wiązań chemicznych mają wpływ następujące czynniki [2]:

- rozwój liści,
- relacja fotosyntezy do respiracji, a więc zdolności pozyskiwania energii słonecznej do energii „oddychania” roślin,
- w jaki sposób i dokąd materia organiczna, powstająca w liściach w wyniku asymilacji węgla, jest rozprowadzana w roślinach, a więc w jaki sposób następuje alokacja asymilacji,
- odradzanie się cienkich korzeni,
- jak efektywnie jest wykorzystywana woda i nawozy, szczególnie azot i fosfor,
- odporność roślin na szereg czynników zewnętrznych.

Rozwój liści

Zadaniem zielonych ciałek komórek roślinnych liści jest pochłanianie energii światła i przekształcanie jej w energię chemiczną. Dlatego powierzchnia liści w relacji do powierzchni gruntu jest istotnym czynnikiem wpływającym na produkcję masy roślinnej. Ważnym czynnikiem jest także czas pochłaniania energii światła. Wczesny rozwój powierzchni liści i późne wędnięcie w jesieni jest korzystne dla trwania procesu fotosyntezy. Duża liczba małych liści bardziej efektywnie gromadzi energię słoneczną aniżeli ta sama powierzchnia dużych liści.

Relacja fotosyntezy do respiracji

Nie cała energia światła absorbowana przez rośliny jest gromadzona w postaci organicznych substancji. Znaczna część jest wykorzystywana w procesie respiracji, a więc w procesie rozkładu dwutlenku węgla i wody, którym towarzyszy wydzielanie wolnego tlenu. Pozostała część, która może być magazynowana w postaci materii organicznej, jest równoważna energii procesu fotosyntezy pomniejszonej o energię towarzyszącą procesowi wydzielania tlenu, a więc procesowi respiracji. Oznacza to, że dla uzyskiwania wysokiej wydajności materii organicznej biomasy musi zachodzić duża intensywność fotosyntezy przy równocześnie małej intensywności respiracji. Ten fakt tłumaczy, dlaczego produkcja masy drzewnej w południowej Szwecji jest w przybliżeniu taka sama jak w lasach na obszarach klimatu tropikalnego. Aczkolwiek sezon wzrostu roślin jest znacznie dłuższy i nasłonecznienie jest znacznie intensywniejsze w lasach tropikalnych. Także jest znacznie większa średnia temperatura. Ponieważ respiracja jest bardzo zależna od temperatury, jest ona o wiele intensywniejsza w lasach tropikalnych aniżeli w lasach szwedzkich. W ten sposób można częściowo tłumaczyć fakt, że plantacja to-

poli w południowej Szwecji, nawadniana i nawożona, produkuje prawie tę samą masę organiczną jak plantacja eukaliptusa w Brazylii.

Alokacja asymilacji

Przez alokację oznacza się rozmieszczanie materii organicznej, przeważnie cukrów, powstającej w liściach, gdzie jest formowana, do różnych części roślin. Różne rośliny różnie rozmieszczają materię organiczną. Rozmieszczają ją w gałęziach, liściach i korzeniach. Z punktu widzenia biomasy energetycznej najbardziej istotne jest rozmieszczanie materii w gałęziach, które corocznie mogą być pozyskiwane i wykorzystywane do celów energetycznych. Wiele iglastych drzew w początkowym okresie wzrostu rozmieszcza materię organiczną w korzeniach i stosunkowo mało w rozwijających się pędach. Wiele odmian wierzby ma stosunkowo płytko i rzadko rozmieszczony system korzeni, podczas gdy materia organiczna jest głównie kierowana do rozrastających się pędów. Zjawisko to zachodzi w początkowych latach wzrostu. W następnych latach wierzba coraz więcej rozmieszcza materii organicznej w systemie korzeni. To zjawisko tłumaczy, dlaczego wierzba jest ścinana w trzy lub pięcioletnich okresach wzrostu, dzięki czemu jest zachowywany stan wzrastania, a w konsekwencji duża wydajność masy drzewnej w pozyskiwanych gałęziach.

Odradzanie się cienkich korzeni

Odradzanie się cienkich korzeni jest stosunkowo skomplikowanym procesem i nasza wiedza o tym jest raczej ograniczona. System korzeni penetruje otaczającą je glebę w poszukiwaniu wody i nawozów jako odżywek. Penetracji dokonują cienkie korzenie o średnicy 1 mm i poniżej 1 mm. Szybkie odradzanie się cienkich korzeni stwarza warunki dla odpowiedniego wzrostu, a więc dla uzyskiwania wysokich zbiorów. W niektórych odmianach wierzby formowanie się cienkich łodyg korzeni zachodzi na tyle szybko, że całkowity wzrost korzeni w sezonie wzrostu jest porównywalny do wzrostu gałęzi wierzby, a okres życia cienkich łodyg korzeni wynosi kilka tygodni.

Efektywność wykorzystywania wody

Drzewa liściaste i iglaste zużytkowują dwukrotnie mniej wody aniżeli zboża lub okopowe rośliny uprawne. Istnieją znaczne różnice w zapotrzebowaniu na wodę przez różne odmiany tych samych gatunków drzew. Istnieje także znaczna rozpiętość w zapotrzebowaniu na wodę przez różne odmiany wierzby.

W podsumowaniu można stwierdzić, że najbardziej istotnymi czynnikami mogącymi mieć wpływ na zdolność gromadzenia energii słonecznej w postaci wiązań chemicznych, a więc na możliwie wysoką produkcję biomasy, są: szybkość rozwoju powierzchni liści, gdzie są rozmieszczane produkty fotosyntezy w roślinach i odradzanie się cienkich korzeni. Wpływ tych czynników może znacznie wzrastać poprzez wybór odpowiednich odmian, poprzez powielanie i usprawnianie metod uprawy.

Możliwa wielkość produkcji biomasy w warunkach normalnej i przyspieszonej uprawy

Badania prowadzone w Szwecji (Langa-Veka, Karinslund) [2] wykazały, że istnieje górna granica biologicznej produkcji biomasy na hektar, uzyskiwana w różnym czasie:

- zawierająca się w przedziale 10-12 ton/ha rok dla **normalnych** warunków uprawy dla różnych rodzajów drzew, którą uzyskuje się dla:
 - wierzby po 2.5 latach,
 - topoli po 6-ciu latach,
 - olchy lub brzozy po 10 -ciu latach,

- świerku po 25 latach,
- buku po około 70 latach,
- dla **krótkookresowej przyspieszonej** uprawy, obejmującej wczesne odchwaszczenie, nawożenie i nawadnianie, osiągalną maksymalnie dla
 - wierzby w ilości od 30 do 35 ton/ha po 5-ciu latach
 - topoli w ilości 25 ton/ha po 10-ciu latach.

Przedstawione powyżej wyniki, stanowiące rezultaty doświadczeń prowadzonych przez Szwedzki Uniwersytet Rolniczy (w Langa-Veka, Skogaby, Flakaliden i Asa), dowodzą dlaczego wierzba, charakteryzująca się największą wydajnością masy drzewnej uzyskiwanej najszybciej spośród innych drzew, została wybrana jako biomasa uprawiana do celów energetycznych [2].

1.2 Rodzaj biomasy preferowany ze względu na sprawność przetwarzania na paliwa ciekłe lub gazowe

Ze względu na rodzaj stosowanych technologii przetwarzania różni się biomasę, której materię organiczną tworzą głównie celuloza lub cukry i skrobia. Pierwszą grupę reprezentuje wierzba i inne rodzaje drewna, drugą rośliny spożywcze.

W technologii przetwarzania biomasy na wtórne nośniki energii, takie jak ciepło, paliwa gazowe i ciekłe, można wyróżnić technologie [3]:

- chemicznego przetwarzania,
- biologicznego przetwarzania.

Do procesów chemicznego przetwarzania biomasy tworzonej przez celulozę należą:

- procesy spalania, dla wytwarzania ciepła,
- proces gazyfikacji lub pirolizy, w wyniku którego uzyskuje się gaz,
- proces gazyfikacji, a następnie proces syntezy metanolu, dla produkcji metanolu.

Technologie biologicznego przetwarzania obejmują procesy fermentacji i beztlenowego zgazowywania.

W wyniku procesu fermentacji uzyskuje się etanol. Surowcami w produkcji etanolu mogą być: cukry zawarte w trzcinie cukrowej, burakach cukrowych, skrobia zawarta w zbożach lub celuloza tworząca podstawowy zrąb ściany komórkowej biomasy. W zasadzie tylko cukry mogą stanowić surowiec do wydajnej produkcji etanolu. W przypadku biomasy tworzonej głównie przez celulozę, a więc drewno, tylko niektóre polisacharydy mogą uczestniczyć w procesie fermentacji uzyskując etanol z etylenu, co znacznie obniża sprawność przetwarzania w stosunku do przetwarzania biomasy drzewnej do metanolu [4].

Sprawność beztlenowego zgazowywania jest uwarunkowana sprawnością działania bakterii w procesie hydrolizy wytwarzającej lotne kwasy i bakterii produkujących wodór, octany lub metan. Jednakże, dotychczas nie znaleziono sposobu generacji bakterii, charakteryzujących się wysoką sprawnością przetwarzania zarówno w procesie fermentacji jak i w procesie beztlenowego zgazowywania.

Oznacza to, że przetwarzając biomasę na paliwa gazowe lub ciekłe największą wydajność energetyczną, zawartą we wtórnych nośnikach energii, z uprawy jednego hektara uzyskiwałoby się stosując krótkookresową uprawę wierzby.

1.3 Korzyści ekonomiczne wynikające z uprawy i przetwarzania biomasy

Uprawa biomasy będzie przyczyniać się najbardziej do rozwoju obszarów wiejskich. Biomasa jako surowiec, ze względu na nieopłacalność jej transportu poza region uprawy, musi być przetwarzana w regionie o promieniu 30-40 km, gdzie jest uprawiana. Przetwarzana do paliw ciekłych pozwoli produkcją własną znacznie zastąpić import

ropy. W ten sposób znaczne kwoty zamiast trafiać do eksporterów ropy mogą zostać przekazane na tereny wiejskie, zasilając dochody mieszkańców regionu. Wartość importu paliw mineralnych jest rzędu 4 mld US\$ rocznie. Przyjmując, analogicznie jak w USA [5], że biomasa w ponad 50 % mogłaby zastąpić ciekłe paliwa importowane, na obszarach wiejskich pozostawałoby około 2 mld US\$ rocznie.

Biomasa stwarza nieograniczony rynek zbytu na produkcję roślinną. Ma to szczególne znaczenie w sytuacji, gdy w Polsce, w Stanach Zjednoczonych i Europie Zachodniej występuje nadmiar produkcji żywności.

Ponadto w Polsce jednostkowa produkcja spożywczych upraw roślinnych jest od 2.6 do 2 razy mniejsza w stosunku do krajów Zachodniej Europy i Szwecji (tablica 4). Wprowadzanie innowacji w postaci intensywnego nawożenia i nawadniania upraw przestaje mieć sens, gdy brak jest rynku zbytu. Taki rynek zapewnia właśnie uprawa biomasy wykorzystywanej do celów energetycznych.

Tablica 4. Dane charakteryzujące plony niektórych upraw roślinnych w krajach Unii Europejskiej i krajach Europy Środkowo-Wschodniej dla 1993 roku (Rocznik GUS 1994 r.)

| | Pol- ska | Biał- o- ruń | Ro- sja | Bel- gia | Da- nia | Fran- cja | Holan- dia | Niem- cy | Szw- ecja |
|---|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------|------------|--------------|---------------|-------------|--------------|
| pszenica | | | | | | | | | |
| produkcja na ha | 33.3 | 30.8 | 20.1 | 68.4 | 75.0 | 63.3 | 85.4 | 64.7 | 61.5 |
| żyto | | | | | | | | | |
| produkcja na ha | 22.6 | 33.8 | 21.4 | 46.7 | 42.9 | 39.4 | 50.8 | 44.3 | 57.9 |
| udział w produk- cji światowej w % | 17.1 | 9.2 | 47.6 | 0.1 | 1.0 | 0.7 | 0.1 | 10.1 | 0.8 |
| jęczmień | | | | | | | | | |
| produkcja na ha | 27.9 | 20.0 | 17.0 | 62.4 | 48.3 | 56.2 | | 50.2 | 42.8 |
| owies | | | | | | | | | |
| produkcja na ha | 23.3 | 21.6 | 12.8 | 39.2 | 46.2 | 44.4 | 52.7 | 47.0 | 45.2 |
| ziemniaki | | | | | | | | | |
| produkcja na ha | 206 | 105 | 112 | 360 | 333 | 362 | 419 | 314 | 288 |
| udział w produk- cji światowej w % | 13.2 | 3.0 | 14.1 | 0.7 | 0.7 | 2.4 | 2.6 | 3.5 | 0.4 |
| buraki cukrowe | | | | | | | | | |
| produkcja na ha | 294 | 264 | 196 | 585 | 508 | 680 | 462 | 509 | 417 |
| mięso z uboju | | | | | | | | | |
| produkcja w kg na mieszkańca | 76.8 | 94.5 | 54.8 | 142 | 355 | 106 | 180 | 73.2 | |
| udział w produk- cji światowej w % | 1.6 | 0.5 | 4.5 | 0.8 | 1.0 | 3.3 | 1.5 | 3.2 | |
| ludność rolnicza jako % ludności ogółem w 1992 r. | 9.9 | brak da- nyc h | brak da- nyc h | 0.7 | 2.4 | 2.2 | 1.4 | 2.1 | 1.9 |

Liczba gospodarstw w Polsce o powierzchni użytków rolnych 7ha i poniżej 7 ha wynosi 68 %. Wobec mechanizacji prac rolnych, korzystanie z kombajnów zbożowych, ziemniaczanych, pras do zgniatania słomy, rzeczywisty czas pracy rolnika gospodarującego ma gospodarstwie 7-mio i poniżej 7-mio hektarowym wynosi około 3 miesięcy w ciągu roku. Uzyskane pieniądze ze sprzedaży zbiorów muszą wystarczyć na wydatki ponoszone w ciągu roku. Takich gospodarstw w Polsce jest około 2 milionów, gospodarujących na glebach słabych i bardzo słabych, których jest odpowiednio 60 i 30 % ogólnej powierzchni uprawnej. Powstaje więc problem restrukturyzacji gospodarstw, a w konsekwencji tworzenia nowych miejsc pracy [6].

Jedynym rozwiązaniem narastającego problemu bezrobocia na obszarach wiejskich, obok edukacji, mogą być rozproszone miejsca pracy uprawy i przetwarzania biomasy. Także w krajach uprzemysłowionych biomasa okazuje się być ważnym źródłem zatrudnienia. Pracochłonność produkcji nośników energii na bazie biomasy jest około 4 do 10 razy większa w porównaniu do pracochłonności analogicznej produkcji na bazie paliw kopalnych. W porównaniu do energii jądrowej, biomasa wykorzystywana do produkcji energii elektrycznej zwiększa 15-krotnie wymagane zatrudnienie.

1.4 Wpływ stosowania biomasy jako paliwa na środowisko

Przewidywana zmiana klimatu w skali globu ziemskiego napawa coraz większym niepokojem. W wyniku użytkowania paliw kopalnych nastąpiła emisja setek miliardów ton gazów cieplarnianych do atmosfery. Przewidywany jest wzrost intensywności opadów, a także wzrost częstotliwości silnych sztormów. Przewidywana jest możliwość zmiany rozkładu stref wegetacyjnych w skali kuli ziemskiej. Istnieje ryzyko powstawania zupełnie nowych zjawisk, które są niemożliwe obecnie do przewidzenia.

Wszystkie uprawy, włączając uprawy energetyczne, pochłaniają węgiel w okresie wzrostu. Ilość pochłanianego węgla może przewyższać ilość emitowanego, ponieważ uprawy energetyczne są wieloroczne. Po żniwach wierzby pozostają korzenie, stabilizujące glebę i regenerujące pędy w następnym roku.

Kwaśne deszcze są konsekwencją emisji tlenków siarki i tlenków azotu do atmosfery w wyniku spalania paliw kopalnych. W składzie chemicznym biomasy nie występuje siarka, a więc nie występuje problem kwaśnych deszczy przy stosowaniu biomasy do celów energetycznych.

Reasumując, uprawa biomasy w skali globalnej może w przyszłości zapobiegać nieprzewidywalnym zmianom klimatu ziemskiego, a także likwidować przyczyny powstawania kwaśnych deszczy.

1.5 Wielkość zasobów biomasy

Wielkość zasobów biomasy drzewnej warunkują dwa czynniki: *powierzchnia uprawna i wydajność z hektara*. Największe możliwości zwiększenia wydajności biomasy w odniesieniu do stosowanych gatunków wierzby tkwią w genetyce, która stwarza warunki do wzrostu wydajności do 40% [7]. Ostatnio wyhodowano gatunki drzew odpornych na choroby, które charakteryzują się szybkim wzrostem i zdolnością regeneracji z pnia po ścięciu [8].

W celu przyspieszenia produkcji biomasy drzewnej rozwinięto i rozwija się *krótkookresową intensywną kulturę* upraw tej wierzby. Jest to kultura upraw drzewostanu, wykorzystująca szybko wzrastające drzewa wierzby, rotację 3 - 4 letnich cykli wyciębu, gęsto sadzonych drzew, z nawadnianiem i nawożeniem gleby. W Szwecji, uprawiając wierzbę typu salix, uzyskiwano wydajność 25-30 ton suchej masy drzewnej z hektara średnio w roku [1].

Wielkość zasobów biomasy w skali globalnej

Równowartości energetyczną biomasy w tonach węgla ocenia się na [9]:

1440 miliardów ton węgla - ilość biomasy znajdującej się na kuli ziemskiej,

160 miliardów ton węgla rocznie - globalna wartość biomasy, która mogłaby być uprawiana do celów energetycznych,

w porównaniu do:

600 miliardów ton - zidentyfikowanych zasobów węgla w skali świata,

24 miliardów ton węgla rocznie - przewidywanego zapotrzebowania na energię pierwotną w 2030 roku w skali świata.

Ocenia się, że:

- w 2050 roku biomasa może zaspakajać przewidywane zapotrzebowanie w skali świata do 50 %.

Przytaczane powyżej dane wskazują na to, że biomasa może stanowić globalnie dostępne odnawialne źródło energii.

1.6 Stan rozwoju uprawy biomasy na świecie

Stany Zjednoczone

W 1977 roku udział biomasy w wytwarzaniu energii elektrycznej i ciepła wynosił 4% i w 2000 roku miał osiągnąć 20 % równowartość 120 mln ton węgla/rok o wartości opałowej 25 GJ/t. Zakładano następujący wzrost w produkcji energii elektrycznej, wykorzystując biomasę jako pierwotny nośnik energii: 2000 r - 140 mln MWh, 2010 r - 280 mln MWh i w 2030 roku - 840 mln MWh. Innym zastosowaniem biomasy miał być bioetanol dodawany do benzyny, jako paliwo w silnikach wewnętrznego spalania. Uważa się, że główną korzyścią stosowania biomasy jako nośnika energii będzie rozwój obszarów wiejskich. Paliwo wytwarzane na bazie biomasy może zastąpić w 50 % import ropy, którą USA importowało w 1997 roku za 50 miliardów US\$. Oznacza to, że na obszary wiejskie mogłoby wpływać około 25 miliardów US\$(1977) rocznie. W konsekwencji mogłaby powstać olbrzymia liczba miejsc pracy w uprawie, pozyskiwaniu biomasy, w zakładach przetwarzania chemicznego biomasy i w elektrowniach [5, 10]. Dla przykładu na każdy milion litrów produkcji etanolu będzie się tworzyć 4500 miejsc pracy. Produkcję 14.65 10⁸ MWh energii elektrycznej i stosując biomasę jako paliwo uprawiane na 20 milionach hektarów, dochody farmerów wzrosłyby o 12 miliardów US\$ rocznie.

Stany Północno-Wschodnie i Północno-Środkowe USA

Stany Północno-Wschodnie i Północno-Środkowe są w USA liderami w rozwoju biomasy - wierzby wykorzystywanej do celów energetycznych. Uważa się, że wytwarzana na terytorium tych Stanów biomasa zredukuje import paliw kopalnych, a więc ropy, węgla i gazu, przekraczający 30 miliardów US\$ rocznie. Utworzy równocześnie nowe miejsca pracy na terenach wiejskich, przyczyni się do znacznego zmniejszenia emisji SO₂, NO_x, czyniąc system energii neutralny ze względu na efekt cieplarniany [11, 12].

Rozwój produkcji biomasy w Północno-Wschodnich i Północno-Środkowych Stanach USA poprzedziły badania prowadzone przez około 20 lat przez Stanowy Uniwersytet Nowego Yorku Nauk o Środowisku i Leśnictwie (SUNY ESF) w Syrakuzie. Badano uprawę topoli i wierzby dla szerokiego zakresu ilości sadzonej wierzby na jednym hektarze i dla różnych długości cyklu rotacji uprawy [13, 14].

W 1994 roku Stanowy Uniwersytet Nowego Yorku Nauk o Środowisku i Leśnictwie utworzył konsorcjum pod nazwą „Salix Consortium and New York Bioenergy” obejmujące ponad 20 organizacji w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie, między innymi Niagara Mohawk Power Corporation (NMPC), New York State Electric and Gas (NYSEG) i New York State Research and Development Authority (NYSERDA).

W 1995 roku Salix Konsorcjum zapoczątkowało studia mające na celu rozpoznanie zagadnienia rozwoju przedsiębiorstwa uprawy wierzby w Stanie Nowy York [11]. Projekt ten stanowił jeden z trzech równocześnie prowadzonych narodowych projektów w ramach programu „The Biomass Power for Rural Development” wspomaganych przez Ministerstwo Energii i Ministerstwo Rolnictwa USA (United States Department of Energy and Department of Agriculture). Dodatkowe wsparcie uzyskano z wielu źródeł, między innymi od NYSERDA, Electric Power Research Institute, Oak Ridge National

Laboratory. Realizując wspomniany program, Konsorcjum miało zbadać i określić główne aspekty dotyczące profesjonalnego rozwoju wierzby stanowiącej surowiec biomasy i innych produktów jej przetwarzania, a także korzyści dla zachowania środowiska i rozwoju ekonomicznego regionu obejmującego Północno-Wschodnie i Północno-Centralne Stany USA [15].

Rozwijany system produkcji biomasy wykorzystywał wyniki badań prowadzonych przez SUNY - ESF, a także wyniki intensywnych prac badawczych uzyskanych w Szwecji [2], Wielkiej Brytanii [16] i Kanady [17].

Miedzy innymi ustalono, że plantacja winna być zakładana mechanicznie w podwójnie sadzonych rzędach o gęstości sadzenia 15300 sadzonek na hektar.

Wierzbę wyselekcjonowano z plantacji aklimatyzowanej w Północno-Wschodnich i Północno-Centralnych Stanów.

Wydajność jednostkowa z uprawy nawadnianej i nawożonej w okresie trzech lat przewyższała 27 ton suchej masy drzewnej na hektar średnio w roku. Z pierwszej rotacji nienawadnianej plantacji uzyskiwano 8.4 do 11.6 ton suchej masy drzewnej na ha na rok. W drugiej nienawadnianej rotacji nastąpił wzrost wydajności o 18 - 62 % w stosunku do pierwszej rotacji.

W ramach programu „The Biomass Power for Rural Development” zrealizowano 13 projektów badawczych dotyczących zagadnień systemowych produkcji biomasy, w tym obejmujących zagadnienia:

- modyfikacji genetycznych wierzby,
- walki ze szkodnikami,
- nawożenia,
- metod przygotowywania terenu pod uprawę biomasy,
- testowania sadzonek i selekcji dla celów rozmnażania,
- usprawnienia sprzętu uprawy,
- warunków magazynowania,
- efektywności metod walki z chwastami

i 4 projekty badawcze związane z ochroną środowiska.

W dwóch miejscach omawianego regionu Stanów zostały założone szkółki sadzonek, systemy nawadniania i chłodne klimatyzowane przechowalnie sadzonek. Sadzonki są pozyskiwane z jednorocznych łodyg wierzby. Produkcja sadzonek w sezonie 1999/2000 wynosiła 1.41 milionów sztuk. Po dwóch do trzech latach od momentu założenia szkółki mogą następować zbiory łodyg przeznaczanych na sadzonki. Jednakże, ażeby sprostać założonej szybkości zakładania produkcyjnych plantacji wierzby zwiększono wydajność produkcji sadzonek poprzez zwiększenie gęstości plantacji od 30000 do 35000 tysięcy roślin na hektar w porównaniu do gęstości produkcyjnej wierzby w ilości 15300 roślin na hektar.

W 1998 roku założono pierwszą plantację na 242 hektarach 14 właścicieli gruntów o areale od 2 do 40 ha. W ciągu ostatnich 7-miu lat, począwszy od 1993 roku, założono szkółki produkcji i genetycznej selekcji w 9-ciu Stanach i w prowincji Quebec w Kanadzie. Poszczególne szkółki zajmują powierzchnie od 0,5 do 1 ha.

Prowadzone studia miały za zadanie rekomendować utworzenie stanowego sponsora, określonego mianem Revolving-Loan Fund, finansującego za każdego właściciela ziemi przygotowanie gruntu i zakładanie plantacji. Przyjęto, że fundusz w kwocie 5 - 8 milionów US\$ pożyczany na okres 10 lat, inwestując w produkcję biomasy na obszarze 4046 ha, byłby całkowicie zwrócony najdalej w czasie 20 lat użytkowania plantacji.

Podstawowym problemem uruchomienia systemu energetycznego, opartego na produkcji wierzby, samowystarczalnego w dłuższej perspektywie, jest wymagany kapitał inwestycyjny. Istniał niepokój właścicieli ziemi przeznaczanej pod uprawę, czy

zakładana plantacja wierzby wytworzy wystarczający dochód w okresie czasu życia plantacji, a więc w ciągu 22 lat. Aby wyjaśnić tę kwestię dokonano analizy systemu energetycznego biomasy, który ma za zadanie współzawodniczyć z systemem opartym na węglu. Przyjęto następujące założenia:

System energetyczny jest finansowany w okresie 10 lat. Każdego roku zakłada się plantację o powierzchni 406 ha. Pierwsza plantacja zostaje założona w 2001 roku, a pierwszy zbiór następuje w 2005 roku. Obszar plantacji po 2016 roku może być powiększony do 20230 - 32368 ha (50000-80000 akrów). Gęstość sadzonek ma wynosić 15300 sztuk na hektar. Zakładana wydajność ma wzrastać w granicach 12.3 do 18.5 ton suchej masy drzewnej na hektar. Cena dostarczanej biomasy ma być poniżej ceny węgla obowiązującej we wschodnich Stanach USA, a więc o cenie 1.23 US\$/GJ.

Konkluzje wynikające z przeprowadzonej analizy są następujące:

1. Liczba pojedynczych dostawców biomasy może stanowić setki rolników. Celowe staje się utworzenie Stowarzyszenia Farmerów Produkcji Biomasy. Ma to ułatwić administrowanie, kontraktowanie, planowanie, zarządzanie produkcją wytwarzania energii elektrycznej i dostawą biomasy wytwarzanej przez wielu producentów dla jednego odbiorcy. Specjalistyczny sprzęt, niezbędny dla zakładania plantacji i zbioru plonów, wymaga znacznego kapitału, który winien być rozłożony pomiędzy indywidualnych producentów. Jeden zestaw takiego sprzętu może obsłużyć powierzchnię 4000 hektarów plantacji biomasy. Pierwszy zestaw ma być finansowany przez Salix Consortium. Po siedmiu latach plantacji będzie wymagany kolejny zestaw sprzętu o wartości 250000 US\$, którego koszt będą musieli pokryć farmerzy, względnie z dotacji odpowiednich konsorcjów.
2. Zwrot pożyczki może nastąpić po 11 latach uprawy. W ciągu trzydziestu lat łączny podatek wpływający do Stanu Nowy York może przekroczyć 15 milionów US\$.
3. Oceniono, że każde 4000 akrów uprawy biomasy będzie przyczyniać się do tworzenia 76 miejsc pracy. Przewidując rynek zbytu dla 320000 hektarów będzie można utworzyć ponad 600 miejsc pracy.
4. Redukcja importu węgla, przy powierzchni uprawy 4000 akrów, pozwoli zmniejszyć wydatki na import o 7.3 miliona \$ rocznie.
5. Konsekwencją zastępowania węgla biomasą będzie redukcja emisji CO₂ o 561000 t/r, SO₂ - 945 ton/r, NO_x - 924 ton/r.

Według informacji zawartych w publikacji „Developing a Willow Biomass Crop Enterprise for Bioenergy and Bioproducts in the United States” [12] w ciągu kilku lat Salix Konsorcjum poczyniło znaczny postęp w rozwoju przedsiębiorstw produkcji biomasy jako surowca energetycznego. Uzyskane wyniki zostały zaakceptowane na posiedzeniu Prezydium Rządu Prezydenta Clintona w Sierpniu 1999 roku, który wzywał do trzykrotnego wzrostu uprawy biomasy do 2010 roku. Jednakże istnieje wiele przeszkód, które należy pokonać, włączając stabilność rynków energii. Konsorcjum będzie nadal działać na rzecz promocji korzyści wynikających z rozwoju obszarów wiejskich i ochrony środowiska w wyniku uprawy biomasy energetycznej. Jednakże, według autorów wyżej wymienionej publikacji, same instytucje naukowe nie będą w stanie pokonać wszystkich barier ograniczających rozwój przedsiębiorstw uprawy biomasy. Wizja rozwoju jasno określona przez władze federalne i rządowe, wspierająca polityka i ustawodawstwo są konieczne, aby biomasa mogła współzawodniczyć z ropą i węglem.

Szwecja

Obecnie w Szwecji biomasa zaspakaja w 17 % zużycie pierwotnych nośników energii, i przewiduje się, że w 2015 roku biomasa zastąpi w 80 % paliwa kopalne w wytwarzaniu ciepła grzewczego i energii elektrycznej, a benzyny i oleju napędowego w

45 %. Planuje się uprawiać biomasę na 800000 ha, gdy całkowita powierzchnia uprawna wynosi 2.4 mln ha [1].

Holandia

Równowartości energetyczne w tonach węgla popytu na energię ma wynosić:

– w 2000 r - 118 mln ton węgla o wartości opałowej 25 GJ/tonę, w tym udział biomasy 1-1.5 %

– w 2015 r - 140 mln, w tym udział biomasy 1.5 - 2.5 %.

Pozostałości leśne i rolnicze mają stanowić równowartość około 2 mld ton węgla.

Dokonano studiów mających na celu ocenę kosztów produkcji energii elektrycznej wytwarzanej przez następujące elektrownie [18]:

- układ gazyfikacji wilgotnej biomasy, turbiny gazowej i parowej o mocy 30 MW i łącznej sprawności wynoszącej 42 %,
- zintegrowany system zgazowywania węgla i układ mieszany turbiny gazowej i parowej o mocy 600 MW i sprawności 44 %.

Oszacowano koszty bezpośrednie i pośrednie obejmujące:

koszty bezpośrednie:

- koszty inwestycyjne i stałe koszty eksploatacji,
- koszty paliwa uwzględniające subsydia państwowe,
- koszt oprocentowania kredytu.

koszty pośrednie:

1. podatki,
2. zatrudnienie,
3. koszt degradacji środowiska w wyniku emisji SO₂, NO_x, pyłu,
4. koszt degradacji środowiska w wyniku emisji gazów cieplarnianych,
5. koszt zanieczyszczenia wód gruntowych związkami azotu,
6. koszt stosowania związków agrochemicznych - pestycydów - oddziaływujących na wody powierzchniowe i gruntowe.

Analizy kosztów dokonano przy następujących założeniach:

Plantacja biomasy

- w 2015 roku uprawa biomasy może obejmować 110000 - 250000 ha,
- czas życia plantacji 24 lata, wyrąb w 3-letnich cyklach, średnia wydajność 12 t suchego drewna rocznie na hektar,
- stosowane paliwo zawierające 50 % wilgotności, w ilości 225000 ton/rok,
- wartość opałowa wilgotnej biomasy 8GJ/tonę,
- elektrownia jest lokalizowana w centrum obszaru przeznaczanego na uprawę biomasy,
- około 10 do 30 % gruntów będzie zlokalizowane wokół elektrowni,
- całkowita powierzchnia obejmująca zabudowę układu gazyfikacji i elektrowni o mocy 30 MW, magazynowanie biomasy i drogi transportowe ma wynosić 9400 ha, a więc około 5% powierzchni uprawy biomasy,
- sumaryczna długość drogi transportu biomasy z pól do elektrowni i z elektrowni do pól ma wynosić 127000 - 220000 km,
- subsydia państwowe dofinansowane do gruntów przeznaczanych pod uprawę biomasy - 500 Euro/ha rok,
- zakładane średnie roczne dochody farmerów - 610 Euro/ha/rok,

Układ gazyfikacji i elektrowni zasilanej biomasa

- koszty inwestycyjne w zakresie 1000 - 2300 Euro/kW_e, (koszty 1000 euro/kW_e dotyczą układu całkowicie opanowanego produkcyjnie),
- stałe koszty eksploatacji 2.1 mln euro/rok,
- stopa procentowa kredytu 3 %,
- ekonomiczny czas życia zakładu przetwarzania 25 lat,
- współczynnik rocznego wykorzystania mocy 80 % (7000 godzin/rok).

Bezpośrednie zatrudnienie w cyklu biomasy i cyklu węglowym wytwarzania energii elektrycznej zestawiono w tablicy 5.

Tablica 5. Bezpośrednie zatrudnienie w cyklu biomasy i węglowym [18]

| | Cykl biomasy 30 MW | Cykl węglowy 600 MW |
|---|-----------------------|------------------------|
| miejsc pracy w roku | 79 | 384 |
| robociznat /MW _e mocy zainstalowanej | 2.6 | 0.64 |
| robociznat /GWh energii produkowanej | 0.37 | 0.107 |

Wspólnota Europejska

Powierzchnia uprawy biomasy do celów energetycznych w Krajach Unii Europejskiej w 1992 roku obejmowała 200000 ha, a w 1995 około 1 miliona ha. Biomasa ma być wykorzystywana w produkcji paliw ciekłych w wyniku stosowania procesu upłynniania celulozy, termochemicznego przetwarzania, a także procesu gazyfikacji biomasy połączonego z elektrownią [10].

Głównymi przedstawicielami krótkookresowej intensywnej kultury upraw jest toполя lub wierzba. W większości prowadzonych badań w Finlandii i Szwecji wykorzystuje się wierzbę. Stosując 1-2 letni okres zakładania plantacji, 2-3 letnią rotację wyřębu uzyskiwano 15 - 20 ton suchej materii na hektar w ciągu roku [19].

Prace badawczo-rozwojowe nad krótkookresową, intensywną kulturą upraw biomasy drzewnej prowadzi się w USA, Szwecji, Finlandii, Austrii, we Włoszech, w Norwegii i Szwajcarii. Główny wysiłek kieruje się na:

- zwiększenie wydajności biomasy z hektara,
- zmniejszenie kosztów wyřębu.

W południowo-zachodnich stanach USA dokonano wyboru regionów odpowiednich dla upraw biomasy drzewnej. Za korzystne warunki klimatyczne, właściwe dla produkcji biomasy, uznano średnie opady roczne wynoszące przynajmniej 30 cm i okres 120 dni wolnych od mrozów [20].

Australia

W Australii zamierza się uprawiać biomasę na 30 milionach ha. Ma ona stanowić surowiec do produkcji metanolu jako paliwa zasilającego bezpośrednio ogniwa paliwowe, stanowiące środek napędu pojazdów mechanicznych [4].

Chiny

Pracownicy Oak Ridge National Laboratory, USA, zgodnie z umową rządową pomiędzy Joint Institute for Energy and Environment (JIEE) a władzami Prowincji Yunnan, Chiny, zawartą w 1989 roku, oszacowują dla tej prowincji potencjalny rynek i uwarunkowania wykorzystywania biomasy do produkcji energii elektrycznej [21].

1.7 Technologie uprawy biomasy

Plantacja wierzby może być usunięta przez zaoranie i na gruncie tym można uprawiać tradycyjne rośliny w dowolnym czasie. Ale okres uprawy wierzby musi trwać przynajmniej 20 lat, aby nastąpił nie tylko zwrot nakładów wymaganych na założenie tej plantacji, ale także zysk. Jest to najdłuższy okres zwrotu kapitału ze wszystkich uprawianych roślin.

Biomasa jest jedną z alternatyw rozwoju obszarów wiejskich, która może zapewnić nieograniczony zbyt na produkcję rolną na obszarach wiejskich. Warunkiem jest konkurencyjność do paliw kopalnych, które ma zastępować. Zapewnić ją mogą: wysoka wydajność jednostkowa biomasy i sprawność jej przetwarzania. Poniżej będą omawiane czynniki, mogące zapewnić wysoką wydajność biomasy z hektara.

1.7.1 Selekcja terenu

Na dobrze zarządzanej plantacji biomasy na odpowiednim terenie można uzyskać plony kilkanaście razy większe w porównaniu do wzrostu biomasy w naturalnych lasach. Każdy rolnik lub leśnik jest świadom zmian w płodności gleby, której wynikiem może być znaczne zróżnicowanie w wydajności z hektara. Czynniki, które mają ważny wpływ na plony są:

- głębokość gleby w sensie jej żyzności, osiągalność wody,
- odczyn gleby, określanej wartością pH , wykazujący stopień kwasowości lub zasadowości gleby, w dopuszczalnych granicach 5.5 - 7.5 [22],
- tekstura gleby, a więc jej budowa wewnętrzna: gliniasta, piaskowo gliniasta, gliniasto piaskowa, ilasto-gliniasta,
- pochyłość gleby, wynosząca do 8 %.

Gleby słabe lub bardzo słabe, których w Polsce jest odpowiednio 60 i 30 % uprawnego arealu w skali kraju, mogą być wykorzystywane ekonomicznie pod warunkiem stosowania odpowiednich upraw i technologii upraw.

Jak ważnym zagadnieniem jest dobór gleby, niech świadczy fakt, że dla rekomendacji doboru gleby w Północno-Wschodnich i Północno-Środkowych Stanach w USA prowadzono szereg odpowiednich czynności i jak wynika z publikacji [22] do roku 2000 nie dokonano ostatecznego rozpoznania.

Jednym z podstawowych wymagań działalności dochodowej z plantacji krótkookresowej uprawy biomasy jest **selekcja terenu**, na którym ma być lokalizowana plantacja. Wybór korzystnego terenu umożliwi osłabianie początkowo popełnionych błędów. Katastrofalną konsekwencją przeszacowania zbiorów jest niedoszacowanie powierzchni plantacji, wymaganej dla uzyskiwania planowanej mocy zakładu przetwarzania biomasy na wtórne nośniki energii. Przeszacowanie wymaganej przez zakład przetwarzania biomasy wielkości powierzchni plantacji na obszarach o niskiej produktywności będzie powodować wzrost wydatków na drogi, infrastrukturę zbiorów i transport, będzie pomniejszać sprawność przeprowadzania zbiorów, a także zwiększy potencjalne oddziaływanie na środowisko [23].

Selekcja terenu musi uwzględniać i bilansować szeroki zakres czynników biologicznych, ekonomicznych i socjalnych. Selekcja i planowanie terenu zakładania plantacji na poziomie krajowym, regionalnym względnie lokalnym, oprócz uwzględniania czynników, które mają ważny wpływ na plony, wymaga lokalnych informacji dotyczących: poprzedniego wykorzystywania gleb, granic zlewiska, systemu rzek i strumieni, dróg, jurysdykcji, właścicieli ziemi, praw własności.

1.7.2 Selekcja sadzonek

Kolejnym krokiem do sukcesu plantacji biomasy jest selekcja sadzonek o wysokiej jakości pod względem genetycznym, właściwych dla danego klimatu i gleby. Większość odmian sadzonek uzyskuje największy przyrost dla specyficznych warunków klimatu i gleby, dla których zostały wyhodowane. Niewłaściwy dobór odmian sadzonek był przyczyną niepowodzeń wielu projektowanych plantacji. Nawet w przypadku wyboru odmian właściwych dla danego terenu mogą zaistnieć znaczne odchylenia od przewidywanego wzrostu dla sadzonek pochodzących z różnych źródeł lub regionów. Największe i najszybsze zyski plantacji można uzyskać, jeśli będą przestrzegane zasady wyboru odpowiednich odmian sadzonek. W pierwszych przedsięwzięciach zakładania plantacji wiele problemów dotyczących produktywności, odporności na choroby i szkodniki, a także jakości krzewów biomasy wynikało ze stosowania niewłaściwego materiału roślinnego.

W ramach określonej plantacji, jeżeli istnieją zmiany w topografii terenu, rodzaju gleby i warunków wilgotności, wówczas mogłoby być požądane stosowanie więcej niż jednej odmiany sadzonek.

Wyboru odmian sadzonek nie można dokonywać na podstawie informacji zawartych w literaturze. Dlatego poletka doświadczalne powinny być zakładane w sąsiedztwie plantacji. Próby wyboru odmian mogą obejmować następujące etapy:

7. produkcję materiału rozrodczego,
8. powielanie materiału rozrodczego o odpowiednich właściwościach, wykorzystywanego w dalszej kolejności w zakładaniu plantacji.

Realizacja wymienionych etapów wymaga czasu. Często odpowiednie decyzje mogą być podjęte dopiero po pierwszym etapie. Etap 1-szy może być realizowany w czasie przygotowywania terenu. Etap 2-gi może następować już w czasie zakładania plantacji.

1.7.3 Zakładanie plantacji

Zakładanie plantacji jest istotną fazą przedsięwzięcia, jakim jest budowa systemu bioenergii o dużej skali. Czas dostawy biomasy jako pierwotnego nośnika energii musi być skoordynowany z harmonogramem budowy zakładu przetwarzającego biomasę we wtórne nośniki energii. Jest to złożone przedsięwzięcie wymagające dużego kapitału. Błędy, popełniane w jakimkolwiek etapie realizacji projektu, mogą przyczynić się do kosztownych opóźnień produkcji wtórnych nośników energii. Błędy mogą dotyczyć: wyboru terenu, sadzonek, powielania materiału rozrodczego, nawożenia, nawadniania, budowy dróg przeznaczonych dla wywozu zbiorów, zabezpieczenia szkółek hodowli materiału rozrodczego przed szkodnikami, odpornymi na choroby i inne zagrożenia.

1.7.4 Przygotowanie terenu

Przygotowanie terenu jest kluczową fazą zakładania plantacji krótkookresowej uprawy biomasy. Przygotowanie terenu dotychczas nie uprawianego obejmuje wytyczenie granic i budowę dróg. Podstawowym celem tych prac jest utworzenie możliwie najkorzystniejszych warunków dla wzrostu sadzonek. Z ekonomicznych względów rekomenduje się użytkowanie terenów, które były już uprawiane. Stosowanie środków chwastobójczych staje się konieczne, gdy koszenie nie przynosi pożądanych rezultatów. Szczególnie dotyczy to powierzchni, na których zarastały agresywne trawy. Doświadczenie USA sugeruje, aby przygotowanie terenu zaczynać przynajmniej z rocznym wyprzedzeniem do czasu zakładania plantacji. Uprawa gleby przyczyni się do redukcji chwastów a także ulepszy strukturę gleby, umożliwiając właściwą penetrację korzeni.

Niewłaściwe przygotowanie terenu jest najczęściej spotykanym błędem popełnianym przy rozpoczynaniu krótkookresowej uprawy biomasy.

Jednakże efektywne odchwaszczanie jest niezbędnym działaniem dla osiągnięcia sukcesu w uprawie wierzby jako surowca energetycznego. Współzawodnictwo chwastów jest najczęściej spotykaną przyczyną braku powodzenia w uprawie wierzby [22]. Szczególnie dotyczy pierwszego i połowy drugiego sezonu wzrostania uprawy. Jeżeli brak jest właściwego przeciwdziałania chwastom, to prawdopodobnie nigdy nie osiągnie się oczekiwanej wysokiej wydajności.

Przygotowanie terenu na dotychczas uprawianym polu musi rozpocząć się w połowie lipca poprzedzającego rok zakładania plantacji. Jakikolwiek małe drzewa, jeżeli się znajdują na tym terenie, muszą być usunięte wraz z korzeniami. Następnie teren winien być skoszony i zagrabiony. Gdy następuje odrastanie chwastów, gleba winna być spryskana odpowiednim środkiem chwastobójczym. Rozpoczęcie przygotowywania terenu w połowie sierpnia jest ryzykowne, ponieważ pozostawałoby zbyt mało czasu na efektywne odchwaszczanie.

Po około dwóch do czterech tygodni działania herbicydów teren winien być zorany i bronowany ciężką bronią. Po zakończeniu bronowania, prawdopodobnie na początku lub w środku września, przygotowanie terenu w tym sezonie jest zakończone.

Wszystkie wystające z gleby kamyki winny być usunięte. Mogłyby one uszkadzać tarcze pił lub taśmy pił łańcuchowych podczas żniw. Usuwanie kamieni byłoby niemożliwe po pierwszym sezonie wzrostania wierzby.

Na wiosnę gleba musi być dokładnie bronowana i spulchniona. Sadzarki maszynowe funkcjonują najlepiej na świeżo bronowanej i spulchnionej glebie.

1.7.5 Nasiona, sadzonki, szkółki sadzonek

Wiele sadzonek nie wschodzi, gdy rozsady są złej jakości, względnie niewłaściwych rozmiarów. Są osiągalne wskazówki, dotyczące właściwego wymiaru cięcia i pielęgnacji. Powszechnym problemem jest niedostateczna jakość wyselekcjonowanego, dostępnego materiału. Uzyskiwanie wczesnego wzrostu sadzonek jest tak ważne dla systemu krótkookresowej uprawy, że czas i pieniądze nie powinny być tracone na stosowanie słabej jakości lub niezdrowego materiału rozrodczego.

Gałęzie wierzby przeznaczane na sadzonki winny być ścinane w pierwszym roku wzrostu z chwilą gdy opadną liście. Nie mogą być przemarznęte i winny być przechowywane w pomieszczeniach o dużej wilgotności i w temperaturze w pobliżu 4 °C. Nigdy nie powinny być przechowywane na nasłonecznionej powierzchni. W okresie zimowym powinno przechowywać się je w paczkach owijanych plastykiem. Przed sadzeniem winny być zanurzone w wodzie na okres dwóch dni. Nigdy nie powinny być sadzone sadzonki z już wypuszczonymi kielkami.

Rozmnażanie roślin oraz prowadzenie szkółek sadzonek będących własnością towarzystw energetycznych może okazać się korzystne dla zakładów o dużej mocy. W przypadku zakładów energetycznych o małej mocy, mniej kosztowny byłby zakup sadzonek w profesjonalnych szkółkach.

Większość gatunków drzew, będących przedmiotem zainteresowania, może być rozmnażana z pociętych gałęzi umieszczanych bezpośrednio w glebie.

W Szwecji dwie firmy oferują sprzedaż sadzonek. Są to Agrobansle i Svalof Weibull AB, które współpracują. Agrobansle sprzedaje rocznie 35 milionów wysokiej jakości sadzonek [24]. Wspólnie z Svalof Weibull pracują nad udoskonalaniem sadzonek wierzby. Agrobansle ma możliwość magazynowania 4000 m³ sadzonek. Wielu farmerów w Szwecji zleca tej firmie prace obejmujące zakładanie plantacji, usuwanie chwastów mechanicznie lub chemicznie i dokonywanie zbiorów. W czasie wiosny po-

nad 50 pracowników tej firmy realizuje prace kontraktowe związane z zakładaniem plantacji przy wykorzystywaniu 8 różnych urządzeń plantujących.

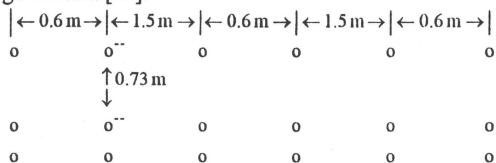
Firma Svalof Weibull AB od 1987 roku zajmuje się powielaniem sadzonek wierzby wykorzystywanych do produkcji bioenergii. Jest jedną z głównych firm zajmujących się powielaniem sadzonek i produkcją nasion. Svalof Weibull AB ma przedstawicielstwa i stacje szkółkarskie w wielu krajach. Obecnie są osiągalne nowe odmiany wierzby o zwiększonej wydajności o 10 do 35 %. W przygotowaniu są sadzonki charakteryzujące się 50 % wzrostem wydajności w stosunku do poprzednio oferowanych.

1.7.6 Gęstość plantacji

Powstaje pytanie, jak gęsto rozmieszczać sadzonki. Gęstość plantacji ma wpływ na szereg czynników, jak: całkowity koszt zakładania plantacji, szybkość zasklepienia się gałęzi powodującej zaciemnienie gleby, co uniemożliwia wzrastanie chwastów, formę wzrostu drzew, cykl wyrębu. W przypadku wierzby cykl ten wynosi 3 lata.

Maksymalna wydajność krótkookresowej plantacji nie jest istotnie zależna od gęstości plantacji, szczególnie jeśli chwasty są eliminowane. Jednakże gęstość plantacji ma wpływ na zachwaszczenie. Duża gęstość plantacji minimalizuje problem zachwaszczenia, bowiem tworzą się sklepienia gałęzi w pierwszym roku, zaciemniające glebę. Plantacja o mniejszej gęstości sadzenia wymaga odchwaszczania przez 2 do 3 lat w każdym cyklu wyrębu. Jednakże chwasty mogą być likwidowane efektywnie przez pielęgnację lub stosowanie herbicydów.

W Szwecji około 13000 sadzonek plantuje się z reguły na powierzchni jednego hektara [24]. W Północno-Wschodnich i Północno-Środkowych stanach USA sadzonki są rozmieszczane w ciągach dwurzędowych w odległości około 1.5 metra pomiędzy skrajnymi rzędami ciągu dwurzędowego. Pozwala to zasadzić 15300 sadzonek na powierzchni jednego hektara [22].



Rys. 1. Stosowane odległości sadzonek w Stanach Północno-Wschodnich i Północno-Środkowych USA

1.7.7 Techniki zakładania plantacji

Technika zakładania plantacji może zależeć od rodzaju sadzonek i terenu. Ręczne sadzenie można uważać za najbardziej naturalny sposób zakładania plantacji, nawet w krajach uprzemysłowionych. Szybkość sadzenia ręcznego, dokonywanego przez odpowiednio przygotowany zespół, może być zbliżona do mechanicznego, chociaż nie można wykluczyć popełniania błędów. Sadzonki pozbawione korzeni powinny być sadzone ręcznie.

W ciągu pierwszych lat istnienia plantacji jest istotne, aby wierzby wzrastały w dogodnych warunkach, zanim rozwinię się silny system korzeni. Jednym z tych warunków jest przeciwdziałanie chwastom. Zakładanie plantacji winno odbywać się wiosną, możliwie najwcześniej. Po pierwszym sezonie wzrostu sadzonki są przycinane, aby w następnym roku wypuściły więcej pędów. W pierwszym roku nie poleca się stosowania

nawożenia, aby nie wywołać wzrostu chwastów zagłuszających sadzonki wierzby. Nawożenia dokonuje się po raz pierwszy w drugim roku istnienia plantacji.

Stosując odpowiednie urządzenia, założenie plantacji na powierzchni jednego hektara (około 13000 sadzonek) wykonuje się w ciągu jednej godziny. Według zdania firmy Salixmaskiner AB sadzonki długości 17 centymetrów są wpychane do gleby. Tylko 1 centymetr sadzonki ma wystawać ponad powierzchnię ziemi. Grubość sadzonki ma wynosić od 1 do 2 cm. Koniec kwietnia do połowy maja jest idealnym okresem zakładania plantacji, ale plantowanie należy zakończyć do połowy czerwca, jeżeli jest to konieczne. Po 10 - 20 dniach pojawiają się pierwsze liście [22]. Mogą pojawić się szybciej w przypadku ciepłych warunków pogodowych. Wcześniejsze zakładanie plantacji niż koniec kwietnia nie jest polecane, ponieważ w tym czasie temperatura gleby i powietrza przyczynia się do powolnego kiełkowania i wzrostu liści. Późne plantowanie w czerwcu jest ryzykowne ze względu na wilgotność gleby, co może opóźniać rozwój korzeni. Jeżeli nie nastąpi właściwy rozwój korzeni podczas pierwszego sezonu wzrostu, wówczas posiadają one skłonność do zamarzania podczas pierwszej zimy. W warunkach wilgotnego gorącego lata późne plantowanie może okazać się sukcesem. Wierzby wzrastają najlepiej w warunkach wysokiej temperatury i dużej wilgotności gleby.

Firma Salixmaskiner AB ze Szwecji oferuje do sprzedaży urządzenie o dużej wydajności określane mianem Step, które dokładnie przygotowuje sadzonki i bezpośrednio je sadi. Zgodnie z raportem nr 5/95 Komisji Leśnictwa Wielkiej Brytanii, Step stanowi najlepsze rozwiązanie spośród 4-rech innych urządzeń tego typu. Jest ono montowane na traktorze średniej mocy z napędem na cztery koła. Step może być wyposażony w urządzenie o dwóch, czterech lub sześciu modułach. Każdy z nich tnie łądygi na długość od 16 do 40 centymetrów, automatycznie ładuje je do magazynków. Moduły otrzymują napęd z traktora. Sadzonki są wciskane do gleby w pionowej pozycji. Do modułów jest mocowana platforma, na której mogą przebywać dwie osoby. Inne zalety urządzenia Step, to:

- wysoka wydajność,
- możliwość pracy na zboczach,
- sadzenie w dowolnej glebie,
- łatwość dopasowywania do wymaganej gęstości sadzenia,
- możliwość wyboru długości cięcia łądyg wierzby i głębokości sadzenia,
- sadzenie sadzonek we właściwej pozycji,
- minimalna liczba uszkodzonych sadzonek,
- umieszczanie w ziemi dwóch sadzonek przez każdy z modułów w ciągu sekundy.

W Południowych Chinach liczba roboczogodzin wymaganych dla założenia plantacji zawiera się w granicach 150 - 300 roboczodni na hektar [25].

1.7.8 Środki chwasto- i owadobójcze

Przeciwdziałanie chwastom jest ważnym problemem w czasie zakładania plantacji. Rozwiązuje się go przez odpowiednią uprawę gleby i stosowanie herbicydów. Najistotniejsza jest likwidacja chwastów w otoczeniu sadzonek. Uprawa przeciwdziałająca zachwaszczeniu jest możliwa, jeśli tylko zachowuje się odpowiednią gęstość plantacji. W przypadku taniej siły roboczej, chwasty wokół drzew można usuwać poprzez ręczne opielanie w pierwszym okresie ich wzrostu. Owady i choroby grzybowe mogą zagrażać plantacji, gdy jest ona zakładana na słabych gruntach lub w przypadku występowania niekorzystnych warunków klimatycznych.

1.7.9 Odrastanie z pni

Po dwóch tygodniach plantowania sadzonki winny wypuszczać pąki listków. Jeżeli tylko 60 - 80 % sadzonek wypuszcza pąki, winno się zakładać plantację od nowa w następnym sezonie [22].

Po zbiorze wyrośniętych krzewów w cyklu trzyletnim następuje odrastanie gałęzi, które są ścinane w kolejnym cyklu. Po siedmiu cyklach usuwa się korzenie i zakłada się nową plantację.

1.7.10 Pierwszy rok wzrastania

Plantacja nie wymaga żadnych zabiegów, jeżeli następuje właściwy wzrost sadzonek i nie ma potrzeby odchwaszczania w pierwszym roku wzrastania, aż od opadania liści. Gdy zabieg odchwaszczania zawiódł i następuje wzrost chwastów, względnie pojawiają się wieloroczne chwasty, koniecznie należy rozpocząć mechaniczne odchwaszczanie. Jednoroczne chwasty można stosunkowo łatwo usuwać jednym zabiegiem mechanicznym. W przypadku pojawiania się wielorocznych chwastów kilkakrotny zabieg mechaniczny jest wymagany. Należy mieć na uwadze fakt, że rozpryskiwanie środków chwastobójczych nie tylko działałoby szkodliwie na chwasty, ale również mogłoby przyczynić się do uszkodzenia drzewek wierzby, gdyż są one wrażliwe na takie działanie.

Drzewka w końcu pierwszego roku wzrastania, a więc w roku zakładania plantacji, osiągają wysokość przynajmniej 60 cm, ale istniały przypadki, gdy drzewka osiągnęły wysokość 2 metrów.

W końcu sezonu zakładania plantacji, gdy opadną liście, począwszy od połowy listopada do początku marca, drzewka muszą być przycinane. Można tego dokonywać stosując pojedynczą kosiarkę. Gałęzie mogą pozostawać na polu. Przycinanie ma promować wiele łodygowe odrastanie, w wyniku którego w drugim roku będzie szybkie następować zasklepienie powierzchni, co ma przeciwdziałać wzrostowi chwastów.

1.7.11 Drugi i trzeci rok wzrastania wierzby

Zakładając, że plantacja jest pozbawiona chwastów, w drugim roku wzrastania stosuje się nawożenie azotem w ilości około 100 kg czystego składnika na hektar. W zależności od rodzaju gleby, na niektórych plantacjach może okazać się konieczne stosowanie nawozów potasowych lub fosforowych. Nawożenia dokonuje się poprzez takie stosowanie rozpryskiwacza, aby nie uszkadzać wyrośniętych drzewek. Czyni się to począwszy od połowy do końca czerwca, w czasie gdy następuje intensywny wzrost i gdy jest szansa odrastania nowych korzeni, zwiększających możliwość pochłaniania nawozów.

W Stanach Północno-Wschodnich i Północno-Środkowych USA prowadzono doświadczenia polegające na wykorzystywaniu wielu organicznych nawozów. Wstępne wyniki okazały się obiecujące. W Szwecji stosuje się nawożenie odpadami komunalnymi.

W pierwszej połowie drugiego sezonu wzrastania wierzby, zanim nastąpi zasklepienie, może okazać się, że trzeba odchwaszczać. Chwasty winny być usunięte przed nawożeniem. Całkowite zasklepienie winno nastąpić w połowie lipca. W końcu drugiego roku wzrastania drzewka osiągają wysokość około 2.4 metra.

W trzecim roku wzrastania wierzby żadne zabiegi pielęgnacyjne nie są wymagane. Drzewka osiągają wysokość w granicach od 3 do 4.5 metra. Gdyby cykl rotacji wynosił 4-ry lata, wówczas w czwartym roku wzrastania drzewka osiągałyby wysokość od 4.5 do 6 metrów.

W Stanach Północno-Wschodnich i Północno-Środkowych USA na pierwszych plantacjach uzyskiwano średnio w roku od 10 do 20 ton suchej masy drzewnej. Na poletkach eksperymentalnych, nawadnianych i nawożonych uzyskiwano 25 ton suchej masy drzewnej średnio w roku. Taka wydajność jest średnią wydajnością uzyskiwaną na plantacjach produkcyjnych w Szwecji [24], gdzie ostatnio uzyskiwano do 30 ton suchej masy drzewnej średnio w roku.

W Stanach Północnych USA uważa się, że w miarę modyfikacji genetycznych wierzby wydajność będzie wzrastała [22]. W 2000 roku w 3-letnim cyklu wydajność w jednym roku zawierała się w granicach 12.35 - 19.76 ton suchej masy drzewnej. Oczekuje się, że średnia roczna wydajność w 3-letnim cyklu może wynosić nawet 37 ton suchej masy drzewnej.

1.7.12 Szkodniki i choroby

Insekty nie stanowiły problemu na eksperymentalnych plantacjach w USA. Zaobserwowane spożywanie listowia było na tyle nie groźne, że nie stosowano środków owadobójczych. Jednakże taki zabieg jest pożądany, jeśli straty w listowiu zaczynają osiągać 50 % pod koniec lipca.

Zaobserwowano pojawianie się chorób grzybowych na wierzbach, ale dotyczyło to niewielkiej liczby wierzb i to określonej odmiany. W Szwecji poważnym problemem okazała się choroba w postaci rdzy zbożowej, powodującej opadanie listowia. W USA choroba ta poczyniła znaczne straty tylko w jednym roku i na jednej odmianie. Zaobserwowano natomiast na jednej z odmian dotychczas nie rozpoznaną chorobę grzybową. Doświadczenie wykazało, że najlepszym przeciwdziałaniem chorobom jest wyhodowanie odmian odpornych na wszelkie zarazy [22].

1.7.13 Równoczesne plantowanie kilku odmian genetycznych

Według doświadczeń Stanów Północno-Wschodnich i Północno-Środkowych USA, sadzenie równocześnie kilku odmian genetycznych na wydzielonych poletkach obszaru plantacji *zmniejsza ryzyko większych strat* [22] w porównaniu do sytuacji, gdy cały obszar plantacji jest obsadzony tylko jedną odmianą. W przypadku, gdy okaże się, że jakaś odmiana uległa niszczeniu w wyniku działania szkodników lub zarazy, a także gdy stała się mało produktywna, istnieje możliwość zasadzenia nowych sadzonek.

1.7.14 Harmonogram prac polowych

Rok przygotowania gleby

| | |
|----------|--|
| lipiec | - skoszenie terenu, jeżeli istnieje taka potrzeba, |
| sierpień | - rozpryskiwanie środków chwastobójczych, |
| wrzesień | - oranie i bronowanie, |

Zakładanie plantacji

| | |
|----------|--|
| kwiecień | - |
| maj | - bronowanie, plantowanie, natychmiastowe spryskiwanie środkami chwastobójczymi, |
| czerwiec | - |
| lipiec | - ewentualne usuwanie chwastów, |
| sierpień | - |
| wrzesień | - |
| grudzień | - przycinanie. |

Pierwszy sezon wzrostu

- maj - ewentualne usuwanie chwastów,
- czerwiec - nawożenie,
- lipiec - ewentualne usuwanie chwastów.

Drugi sezon wzrostu

- kwiecień - brak jakichkolwiek zabiegów, jedynie monitorowanie obecności szkodników i zaraz,

Trzeci sezon wzrostu

- kwiecień - brak jakichkolwiek zabiegów, jedynie monitorowanie obecności szkodników i zaraz,

- druga połowa listopada -
- grudzień -
- styczeń - żniwa
- luty -
- pierwsza połowa marca - żniwa

Początek (pierwszy rok) drugiej rotacji

- Kwiecień - brak jakichkolwiek zabiegów,
- Maj - brak jakichkolwiek zabiegów,
- Czerwiec - nawożenie

↓

Pięć do sześciu dodatkowych 3-letnich rotacji

1.7.15 Żniwa, transport, magazynowanie i przygotowanie biomasy jako paliwa

Żniwa biomasy mają znaczny udział w kosztach jej produkcji. W krajach uprzemysłowionych włożono wiele wysiłku w opracowanie urządzenia stanowiącego żniwiarkę biomasy. W wyniku prowadzonych prac w latach 80-tych przekonano się, że żniwa biomasy wymagają urządzenia o odpowiednich rozmiarach, które mogłyby ciąć i zbierać dużą ilość stosunkowo cienkich drzew. Konwencjonalny sprzęt do wyrębu leśnego jest nieodpowiedni, ponieważ jest zaprojektowany dla wyrębu wolno stojących pni.

Większość prac prowadzonych w krajach uprzemysłowionych dotyczących opracowania żniwiarki biomasy koncentrowała się nad projektem tak zwanego „zbierającego drwa”, zamocowywanego do standardowych traktorów. Tego typu żniwiarki spełniają trzy funkcje: odrąbywanie lub ścinanie, czasowe magazynowanie i rozładowywanie. Prototyp opracowywany w USA przed 1995 rokiem, oznaczony symbolem Hyd-Msch FB-7, tak zwany „ciągły zbierający drwał”, jest wyposażony w dwie piły obracające się w przeciwnych kierunkach. Ramiona urządzenia załadunkowego tłoczą urąbywane gałęzie do kosza. Gdy kosz napelni się, gałęzie są wyrzucane, równoległe do drogi żniwiarki biomasy. Inne urządzenie zbiera nagromadzone drzewa, tnie na kawałki i ładuje na przyczepę.

W krajach uprzemysłowionych koszt żniw zawiera się w granicach 18 - 35 US\$/tonę suchej masy drzewnej pociętej na kawałki [23]. W Szwecji firma Salixmaskiner oferuje do sprzedaży dwa rodzaje żniwiarki biomasy, określane mianem Bender i Bundler. Główne zalety Bendera są następujące:

- niski koszt,
- małe obciążenie gleby,

- minimalne uszkodzenia pni wierzby,
- wierzba nisko ścinana,
- minimalne straty masy drzewnej w czasie żniw,
- duża wydajność w stosunku do wymaganej mocy,
- zdolność cięcia także przy dużej powłoce śniegu,
- wysoka jakość pociętych gałęzi.

Ponadto typ Bunder zapewnia:

- możliwość dopasowywania żniwiarki do odległości pomiędzy rzędami wierzb i sposobu rozmieszczania ich w rzędach.

W przeciwieństwie do krajów uprzemysłowionych, gdzie prace żniwne biomasy są zmechanizowane, w krajach rozwijających się do żniw biomasy wykorzystuje się pracę rąk ludzkich i piły łańcuchowe. Wydajność operatora obsługującego się piłą łańcuchową w ciągu 8-miu godzin pracy szacuje się na około 3.5 ton suchej masy drzewnej na godzinę. Po ścięciu następuje załadowanie na przyczepy transportowane do zakładów przetwarzania. Na obszarach, gdzie występuje bezrobocie, a także niedostatek kapitału, ręczne ścinanie i wyeksportowanie masy drzewnej jest stosowanym rozwiązaniem. Przykładem mogą być Chiny i Filipiny. W Południowych Chinach wymagana liczba robocizni dla zebrania biomasy z jednego hektara zawiera się w granicach 75 - 130 [25].

W czasie ścinania i transportu masy drzewnej występują nieznaczne straty. Stanowią one zwykle 5 % suchej masy drzewnej.

Drewno bezpośrednio po ścięciu zawiera około 50 % wody. Fakt ten musi być uwzględniony w systemie przetwarzania biomasy. Obecność wody w drewnie, jeżeli nie jest ono spalane w odpowiednim palenisku, może znacznie obniżyć sprawność przetwarzania, obniżając temperaturę gazów spalania. Kotły specjalnie zaprojektowane dla spalania wilgotnej biomasy eliminują ten problem, jednocześnie następuje podwyższenie kosztów inwestycyjnych. Wilgotność biomasy tworzy także dodatkowe problemy przy jej magazynowaniu.

W umiarkowanym klimacie po okresie wzrostu biomasy następuje przerwa w wegetacji i dokonuje się żniw. Opadające liście mogą przyczynić się do użyźniania gleby. W kolejnym okresie wzrostu następuje przerwa w dostawie surowca z plantacji do zakładu przetwarzającego. Jednym z rozwiązań warunkującym ciągłą dostawę może być magazynowanie masy drzewnej pozyskiwanej w okresie jesienno-zimowym. Magazynowanie surowca przez dłuższy okres będą towarzyszyć straty, niekiedy znaczne, jeżeli wilgotność powietrza jest duża. Straty mogą osiągać 2 % w jednym miesiącu magazynowania. Rozwiązaniem pozwalającym unikać strat magazynowania jest dokonywanie żniw w sposób nieprzerwany w ciągu całego roku. Takie rozwiązanie nie zapewnia jednak właściwego odrastania pędów i może prowadzić do konieczności wymiany pni.

Przy projektowaniu urządzeń magazynowania biomasy należy uwzględnić następujące aspekty:

- powierzchnia magazynowa winna być usytuowana w pobliżu zakładu przetwarzania,
- kształt drewna magazynowanego: kawałki, klocki lub całe gałęzie,
- ewentualne suszenie biomasy,
- niezawodność dostawy paliwa w wymaganej ilości i wymaganym czasie,
- sezonowe warunki klimatyczne,
- wymagania eksploatacyjne zakładu przetwarzania.

System magazynowania obejmuje zarówno pomieszczenia zadaszone, jak i powierzchnie otwarte. Na powierzchniach nie zadaszonych drewno jest magazynowane

bezpośrednio na ziemi lub na wybetonowanych płytach. Rozróżnia się nieaktywne powierzchnie magazynowania i aktywne, na których gromadzi się drewno niezbędne do pokrycia 3-dniowego zapotrzebowania na paliwo. Przemieszczania paliwa pomiędzy wymienionymi powierzchniami można dokonywać przy użyciu sprzętu mechanicznego lub pracy ręcznej. W technologii opracowanej przez Energy Performance System, Oak Ridge National Laboratory, USA, stosuje się do magazynowania całych gałęzi wierzby powierzchnię zadaszoną o dużych rozmiarach, w której do osuszania wykorzystuje się ciepło odpadowe siłowni. W magazynie przechowuje się 30-to dniowe zapotrzebowanie na paliwo [23].

Jakość i to czy gałęzie podczas pozyskiwania w czasie żniw są lub nie są pocięte na kawałki może mieć znaczny wpływ na projektowanie i eksploatację zakładu przetwarzania, a także na sposób magazynowania.

Szereg urządzeń do cięcia, ładowania i transportu jest już osiągalnych na rynku. Istnieje także wiele opcji przygotowywania paliwa. Drewno może być cięte na kawałki bezpośrednio podczas ścinania lub przed podawaniem do kotła.

1.7.16 Uwagi

Wymagania dla uzyskania sukcesu w krótkookresowej uprawie wierzby są rygorystyczne. Dopóki personel nie uzyska odpowiedniego doświadczenia, zanim zacznie się zakładać plantacje na dużą skalę, w nowym przedsięwzięciu winien być uwzględniany okres uczenia się na stosunkowo małych plantacjach. A wszystko musi poprzedzać pozyskiwanie wiedzy o tym czego inni już doświadczyli. Nie można popełniać błędów, starając się tak ukierunkować prace badawcze, aby samemu hodować najbardziej wydajne sadzonki, aby wiedzieć, jak zakładać plantację, jak organizować przedsiębiorstwa uprawy biomasy i jej przetwarzania, i jak transformować możliwie najkorzystniej wieś obecną do obszarów rozwijających się w sposób zrównoważony, w których trudno będzie rozpoznać różnicę pomiędzy wsią i miastem.

2 Technologie przemiany biomasy - produkcji energii elektrycznej

Uprawa biomasy może zapewnić nieograniczony zbył na produkcję rolniczą, jeżeli będzie zastępować paliwa kopalne, takie jak węgiel, ropa i gaz, i będzie wobec nich konkurencyjna. Aby taka sytuacja mogła zaistnieć, musi być duża wydajność biomasy z hektara i wysoka sprawność jej przetwarzania jako nośnika pierwotnego energii na wtórne nośniki energii. Poprzednio rozważano uwarunkowania dla uzyskiwania dużej wydajności z hektara. Poniżej omówi się technologie mogące zapewnić wysoką sprawność przetwarzania.

2.1 Technologie przetwarzania obecnie osiągalne

Elektrownie z obiegiem turbiny parowej opalane biomasą wykorzystywałyby te same technologie, jakie stosuje się w elektrowniach opalanych węglem, za wyjątkiem technologii biologicznego przetwarzania biomasy. Oczywiście inne byłyby technologie przygotowywania paliwa i technologie oczyszczania spalin i odsiarczania. Niższa wartość opałowa i gęstość drewna w porównaniu z węglem narzuca konieczność stosowania większej pojemności paleniska i większej powierzchni przejmowania ciepła. Koszt przygotowania biomasy i zwiększonej powierzchni komory spalania biomasy byłby równoważny kosztowi technologii oczyszczania spalin i odsiarczania w elektrowniach węglowych. Jednakże sprawność konwencjonalnego kotła opalanego wilgotną biomasą wynosi 65 - 75 %. Ogólna sprawność takiej elektrowni byłaby więc w granicach 20 - 25 %.

2.2 Technologie biologicznego przetwarzania biomasy

W tablicy 6 podano ilości w molach CO₂/MJ dwutlenku węgla, powstającego podczas produkcji i spalania węgla dla wybranych produktów węgla. Najmniejsza emisja CO₂ powstaje podczas spalania węgla. Czym większy jest stosunek wodoru do węgla w rozpatrywanych nośnikach energii tym większa jest łączna emisja CO₂. Wynika to z faktu, że produktem ubocznym produkcji wodoru przy zastosowaniu reakcji zwrotnej



jest CO₂. Stąd wniosek, że technologie biologicznego przetwarzania mogą przyczynić się w pewnym stopniu do zmniejszenia emisji CO₂.

Tablica 6. Porównanie wytwarzanego CO₂ dla wybranych nośników energii podczas procesu produkcji i spalania

| Rodzaj nośnika energii | Produkcja | Spalanie | Łącznie |
|------------------------|-----------|----------|---------|
| C | - | 2,54 | 2,54 |
| CH ₂ | 1,36 | 1,61 | 2,97 |
| CH ₄ | 2,17 | 1,25 | 3,42 |
| CHOH | 1,92 | 1,57 | 3,49 |

Jednym z powodów wzrastającego zainteresowania technologiami przetwarzania biologicznego jako źródła paliw jest to, że nie wytwarzają jako produktu ubocznego CO₂. Mimo to, nie należy oczekiwać, że przetwarzanie biologiczne biomasy będzie miało znaczny udział w ogólnej produkcji paliw. Jednakże istnieje zainteresowanie przetwarzaniem biologicznym odpadów komunalnych, a także węgla.

Istnieją dwa procesy biologicznego przetwarzania, mające znaczenie w produkcji syntetycznych paliw i ochrony środowiska. Są to:

- fermentacja biomasy do paliw ciekłych,
- beztlenowe biologiczne zgazowywanie biomasy.

2.2.1 Fermentacja biomasy

Własności biomasy

Składnikami materii organicznej, które mają znaczenie przy wykorzystywaniu jej do celów energetycznych, są:

- węglowodany,
- lignina.

Wszystkie węglowodany reprezentują sacharydy w postaci cukrów lub polimerów cukrów. Znanymi cukrami są sacharoza i glukoza. Sacharoza stanowi podstawowy cukier soków roślinnych. Glukoza jako cukier występuje w wielu owocach. Podobnie jak w innych związkach organicznych, istnieje wiele izometrycznych form, w których atomy cukru mogą być powiązane w różny sposób. Niektóre z nich to: D-glukoza, D-mannoza i D-fruktoza. Polimery cukrów są reprezentowane przez celulozę, skrobię i hemicelulozę. Nazywa się je polisacharydami.

Z punktu widzenia produkcji paliw ciekłych bardzo istotną właściwością biomasy jest to, czy ulega ona procesowi fermentacji. Temu procesowi mogą ulegać tylko następujące cukry: D-glukoza, D-mannoza, D-fruktoza, D-galaktoza i maltoza. Inne cukry mogą być przetworzone do cukrów ulegających fermentacji poprzez proces hydrolizy w

obecności kwasu lub enzymu. Dla przypomnienia wyjaśnia się, że hydroliza jest reakcją podwójnej wymiany przebiegającej pomiędzy wodą i substancją w niej rozpuszczoną, prowadzącą do powstawania cząsteczek nowych związków chemicznych.

Sacharoza, skrobia i hemiceluloza poprzez proces hydrolizy mogą być przetworzone do cukrów podlegających procesowi fermentacji. Celuloza i lignina nie podlegają procesowi hydrolizy. Z tego względu, podstawowym problemem przemiany biologicznej biomasy staje się znalezienie sposobu przemiany celulozy do hemicelulozy, a następnie do etanolu.

Proces fermentacji

Proces fermentacji przebiega zgodnie z reakcjami:



Można zauważyć, że w przedstawionych reakcjach fermentacji na dwie molekuly produkowanego etanolu traci się jeden atom węgla, zawartego w CO_2 , na trzy atomy węgla uczestniczącego w reakcji łącznej.

Stan rozwoju

Jak wspomniano poprzednio, głównym przedmiotem badań jest opracowanie metody przemiany celulozy, zawartej w biomasie drzewnej i odpadach komunalnych, w etanol. Badania te prowadzono głównie w USA, Szwecji, Włoszech, Republice Federalnej Niemiec i Szwajcarii. Badania dotyczyły takich zagadnień jak:

hydroliza w obecności kwasu siarkowego [26-29],

hydroliza celulozy w hemicelulozę w obecności enzymów [30-32],

genetyka bakterii beztlenowych przyczyniających się do fermentacji celulozy w etanol [29, 33],

enzymy mogące uczestniczyć w nowych metodach produkcji alkoholu jako paliwa [34-36],

beztlenowa produkcja etanolu [37].

Hydroliza w obecności kwasów jest technologią, która w najbliższej przyszłości może stać się handlowo dostępna. W zastosowaniu do pozostałości rolniczych była rozwijana i badana przez Muscle Shoals, Tennessee Valley Authority [28]. Uzyskano w skali laboratoryjnej 90 % sprawności przemiany celulozy i hemicelulozy do cukrów. Podobne rezultaty uzyskano stosując inne surowce wejściowe.

W Solar Energy Research Institute, USA, opracowano technologię, opartą na hydrolizie w obecności enzymów, pozwalającą przetwarzać jeden ze składników biomasy - celulozę w etanol, a pozostały składnik ligninę spalać jako paliwo w kotle produkując ciepło [38]. Badania oparte na zastosowaniu hydrolizy enzymatycznej prowadzono również w Szwecji [31].

Znaczenie

Technologia przetwarzania biomasy w etanol poprzez proces fermentacji nie będzie mogła zastąpić takich paliw jak benzyna i nie będzie w stanie rozwiązać przyszłych problemów zaopatrywania w paliwa ciekłe. Niemniej jednak stwarza potencjalne możliwości zmniejszenia emisji CO_2 do atmosfery. Jednym z produktów ubocznych fermentacji biomasy jest proteina. Fakt ten może stać się jednym z czynników integrujących lokalny system energii z rolnictwem.

2.2.2 Beztlenowe biologiczne zgazowywanie biomasy

Opis procesu

Całkowita degradacja beztlenowa materii organicznej w CO_2 i CH_4 wymaga działania czterech głównych grup bakterii dokonujących przemianę materii. Są to:

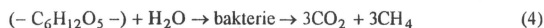
bakterie fermentujące, uczestniczące w procesie hydrolizy, wytwarzające lotne kwasy, CO_2 i H_2 ,

bakterie produkujące wodór i octany, degradujące kwasy na octany, CO_2 i azot,

bakterie produkujące octany,

bakterie wytwarzające metan i dwutlenek węgla.

Łączny proces beztlenowego zgazowywania celulozy można zapisać w postaci



Należy zauważyć, że na sześć atomów węgla uczestniczących w reakcji traci się dwa atomy węgla zawartego w CO_2 , który stanowi nieużyteczny produkt uboczny produkcji.

Stan rozwoju

Proces beztlenowego zgazowywania odpadów zwierzęcych jest handlowo dostępny [33]. Proces biologicznego zgazowywania celulozy jest przedmiotem badań, w których głównymi problemami badawczymi są:

mikrobiologia beztlenowej fermentacji celulozy [39],

beztlenowe zgazowywanie hemicelulozy [40].

Wspólnym problemem zgazowywania beztlenowego wszystkich rodzajów biomasy jest opracowanie sprawnej i taniej metody redukcji CO_2 w biogazie [41, 42, 43].

Efekty ekonomiczne

W Danii opanowano technologię wytwarzania biogazu z odpadów zwierzęcych dla farm obejmujących 700 sztuk zwierząt. Roczna produkcja gazu, ze sprawnością 29 %, zawierającego około 64 % metanu wynosi 2300 GJ. Jednostkowy koszt inwestycyjny i stałe jednostkowe koszty eksploatacji wynoszą odpowiednio 42 i 1,85 \$(1980)/GJ/rok.

Znaczenie

Zgazowywanie beztlenowe biomasy drzewnej mogłoby współzawodniczyć z gazyfikacją chemiczną drewna tylko wówczas, gdyby sprawność zgazowywania beztlenowego znacznie wzrosła. Z drugiej strony, przegląd informacji o technologiach wskazuje, że w ostatnich latach zaznaczył się nieznaczny postęp w podniesieniu sprawności omawianej technologii. Mając to na uwadze można stwierdzić, że zgazowywanie beztlenowe biomasy może mieć znaczenie w przypadku:

ochrony środowiska,

wykorzystywania lokalnych zasobów odpadów zwierzęcych.

2.3 Technologie zgazowywania biomasy w połączeniu z turbiną gazową

W ostatnich latach opracowano w USA technologię spalania wilgotnego paliwa, tak zwaną Whole Tree Energy (WTEtm) [44]. Zapewnia ona sprawność paleniska rzędu 87 % i ogólną sprawność elektrowni rzędu 35 %. Jest więc porównywalna ze sprawnością nowoczesnej elektrowni opalanej węglem. WTEtm jest technologią stosującą pro-

ces suszenia paliwa zintegrowany z technologią turbiny parowej. Ciepło odpadowe podgrzewane przez spaliny przy 54 °C jest wykorzystywane do suszenia drewna, umieszczonego w dużym budynku o zdolności gromadzenia 30-dniowego zapasu paliwa do kotła. WTEtm spala całe gałęzie, nie wymaga cięcia ich na drobne kawałki, co obniża koszt zbiorów biomasy. Koszt energii elektrycznej u odbiorcy uzyskiwany z tej elektrowni jest oszacowany na 0.043 US\$/kWh lub około 0.015 US\$/kWh mniej aniżeli w przypadku elektrowni węglowej [45]. Istnieje możliwość obniżenia kosztów WTEtm w przypadku jednostek o mocy 25 MW. Jednakże można przyjąć, że technologie, wykorzystujące jako paliwo biomasę oparte na cyklu parowym turbiny, nie będą stanowić technologii XXI wieku.

Najbardziej obiecującą technologią elektrowni opalanych biomasą jest technologia wykorzystująca turbiny gazowe pracujące w cyklu gazowym Braytona (patrz uzupełnienie). Są one obecnie dostępne w handlu i pracują w tak zwanym układzie mieszanym turbiny gazowej i parowej. Główną korzyścią stosowania turbiny gazowej jest możliwość obniżenia kosztów inwestycyjnych, na które ma nieznaczny wpływ wielkość mocy jednostki. W przypadku zastosowania turbiny gazowej istnieje możliwość osiągnięcia ogólnej sprawności rzędu 45 %. Możliwa jest także budowa modułowa tych turbin. Technologia turbiny gazowej, wykorzystująca biomasę jako energię pierwotną, jest zintegrowana z układem zgazowywania biomasy. W układzie tym, w wyniku chemicznego przetwarzania biomasy, uzyskuje się gaz. Jest on przed spalaniem w turbinie chłodzony i oczyszczany. Istnieje szereg opracowanych technologii typu BIG/GT (Biomass- Gasifier/Gas Turbine).

W Batelle Columbus Laboratory (Ohio) USA podjęto się opracowania zintegrowanego układu wysokokalorycznego zgazowywania biomasy w połączeniu z układem turbiny gazowej (tak zwany Vermont Gasifier Project) [46]. Układ zgazowywania składa się z dwóch oddzielnych gazyfikatorów o złożu fluidalnym, które cyrkuluje pomiędzy dwoma gazyfikatorami. Uzyskuje się gaz o wartości opałowej 18 MJ/m³ [47].

2.4 Układ gazyfikacji biomasy i turbiny gazowej

Nowa generacja elektrowni zasilanych biomasą małej mocy (poniżej 20 MW) jest rozwijana jako układ mieszany zgazowywania biomasy i turbiny gazowej o cyklu Braytona. Oczekuje się, że takie elektrownie pozwolą zwiększyć sprawność i równocześnie obniżyć koszty wytwarzania energii z takiego paliwa, jakim jest biomasa. Poniżej zostaną przedstawione koncepcje ze szczególnym zwróceniem uwagi na zastosowanie turbin gazowych w układzie z gazyfikacją biomasy.

2.4.1 Uwagi wstępne

Istnieje zapotrzebowanie w skali świata na technologie wytwarzania energii elektrycznej przy użyciu biomasy, stanowiące rozwiązania konkurencyjne dla elektrowni opalanych paliwami kopalnymi i elektrowni jądrowych. Obecnie liczba elektrowni zasilanych biomasą jest proporcjonalnie mała w stosunku do osiągalnych zasobów biomasy. Powstaje pytanie, dlaczego tak się dzieje ?

Po pierwsze, jakkolwiek proponowana technologia elektrowni zasilanej biomasą winna być konkurencyjna z innymi rozwiązaniami technologicznymi elektrowni. W większości przypadków jedynym wyborem są elektrownie wykorzystujące paliwa kopalne, które są bardzo ekonomiczne. Są to niezawodne rozwiązania wykorzystujące turbiny gazowe skojarzone z cyklem parowym turbiny parowej. Mogą być instalowane stosunkowo szybko i budowane w małej jak i dużej skali. Paliwa kopalne są ogólnie dostępne po stosunkowo niskiej cenie.

Po drugie, elektrownie zasilane biomasą, wykorzystujące mniej sprawne technologie kocioł - turbina parowa, charakteryzują się wyższymi kosztami inwestycyjnymi na

kW instalowanej mocy elektrycznej. Wykorzystują one paliwo, które nie jest jednorodne, wymaga większego i bardziej złożonego paleniska, szczególnie w porównaniu ze spalaniem ropy czy gazu.

Głównymi powodami, dla których rozważa się rozwój elektrowni zasilanych biomasą jest możliwość wykorzystywanie obfitych lokalnych zasobów biomasy, które stanowią źródła energii odnawialnej. Niezwykle istotnym jest również aspekt ekologiczny. Jednakże efektywne wykorzystywanie tych zasobów wymaga powstania nowej generacji elektrowni.

2.4.2 Układ gazyfikacji biomasy o złożu fluidalnym i turbiny gazowej

Schemat zintegrowanego układu reaktora gazyfikującego (gazyfikatora) o złożu fluidalnym ciśnieniowym zasilanym powietrzem [47] i turbiny gazowej pokazano w w pracy [100]. Paliwo jest podawane pod ciśnieniem po uprzednim zdrobieniu. Gazyfikator jest zasilany powietrzem sprężonym przez sprężarkę zintegrowaną z turbiną gazową, która napędza generator prądu zmiennego. Gaz z gazyfikatora przechodzi przez separator, usuwający z gazu składniki niepożądane, zanim osiągnie komorę spalania.

Jedna z wersji układ zintegrowany gazyfikatora biomasy o złożu fluidalnym i turbiny gazowej przeszła już badania testowe. Uważa się, że system ten musi przejść wiele dodatkowych badań testowych zanim stanie się ofertą handlową.

Uważa się, że integracja gazyfikatora o ciśnieniowym złożu fluidalnym, cyklu Braytona turbiny gazowej i cyklu Rankina turbiny parowej pozwoli praktycznie uzyskać wysoką sprawność. Obecnie podobną koncepcję, wykorzystując biomasę jako paliwo, rozwija się na Hawajach [48], w Szwecji [49], Finlandii [50], USA, stan Minnesota [51], i innych krajach Europy [52].

System Cratech działa przy ciśnieniu 13.8 atm, zasilaniu 2.2 tony biomasy na godzinę, o temperaturze gazyfikacji 750 °C. Praca reaktora pod ciśnieniem dopuszcza większe obciążenie ciepła na jednostkę powierzchni reaktora, redukuje rozmiary oczyszczacza gazu i eliminuje konieczność sprężania gazu przed dopływem gazu do turbiny gazowej. Bezpośrednia gazyfikacja zamiast pośredniej pozwala zmniejszać złożoność gazyfikatora.

2.5 Zintegrowany układ gazyfikacji biomasy, turbiny gazowej i parowej

Obecnie w skali świata moc elektrowni zasilanych biomasą jest rzędu kilkanastu tysięcy MW, w tym w USA 8500 MW [53]. Przeważająca większość zainstalowanej mocy stanowią technologie oparte na cyklu Rankina turbin parowych, zasilanych moką biomasą, o stosunkowo niskiej sprawności wynoszącej średnio 25 %. W konsekwencji, wielkość mocy instalowanej (elektrowni) była ograniczana niską sprawnością i osiągalną ilością biomasy w obszarze o określonym promieniu ze względu na ekonomicznie uzasadnione koszty transportu. W rezultacie jednostkowe koszty inwestycyjne były wysokie. Ostatnio opracowuje się technologie elektrowni zasilanych biomasą, pozwalające osłabiać uwarunkowania niskiej opłacalności elektrowni zasilanych biomasą. Takie wysiłki podjęto w National Renewable Energy Laboratory, NRNL, USA, które wspólnie z Oak Ridge National Laboratory, ORNL, i Departamentem Energii tworzą - na mocy inicjatywy prezydenta Clintona - Narodowe Centrum Bioenergii w USA. Poniżej zamieszczone zostały wybrane informacje o rozwiązaniach proponowanych przez te instytuty.

Ostatnio dokonano postępu, który pozwala znacznie zwiększyć efektywność wykorzystywania biomasy jako paliwa. Zawansowane technologicznie turbiny gazowe i technologia cyklu mieszanego turbiny gazowej i parowej są obecnie dostępne w sprzedaży. Dokonuje się weryfikacji tych technologii dla gazu naturalnego i gazu uzyskiwa-

nego w wyniku gazyfikacji węgla. Technologie gazyfikacji biomasy przechodzą obecnie etap rozwoju układów pilotowych. Połączenie dwóch technologii: zgazowywania biomasy i cyklu mieszanego turbin, pozwala dwukrotnie zwiększyć obecnie osiągalną sprawność wytwarzania energii elektrycznej. W opracowywanym w NRLN układzie zintegrowanym dobowe zużycie biomasy ma wynosić 2000 ton suchej masy. Połączenie zaawansowanych technologii i systemu podaży paliwa ma utworzyć rynek zbytu na technologie bioenergii. Przyjmuje się, że dalsze zwiększenie sprawności jest możliwe do osiągnięcia poprzez zastąpienie komory spalania gazu ogniwami paliwowymi.

W prowadzonych badaniach w NRLN dotyczących zintegrowanych układów gazyfikacji biomasy, turbiny gazowej i parowej uwzględniano - w trzech kolejnych wariantach tego układu - następujące rodzaje reaktorów gazyfikujących [53, 54]:

- gazyfikator **wysokociśnieniowy** z powietrzem jako czynnikiem gazyfikującym, **bezpośrednio** dostarczającym ciepłem, o złożu fluidalnym, opracowywany przez Institute of Gas Technology, ITG, USA,
- gazyfikator **niskociśnieniowy** z powietrzem jako czynnikiem gazyfikującym, **pośrednio** dostarczającym ciepłem, o złożu fluidalnym, opracowywany przez Battelle Columbus Laboratory, BCL, USA
- gazyfikator **niskociśnieniowy** z powietrzem jako czynnikiem gazyfikującym, z **bepośrednio** dostarczającym ciepłem, o złożu fluidalnym, opracowywany przez Thermiska Processor AB, TPS, w współpracy z ABB-Flakt.

Jednym z czynników, pozwalających na uzyskanie możliwie najwyższej sprawności, była integracja gazyfikatora i układu mieszanego turbiny gazowej i parowej. Turbina gazowa, której moc wynosiła poniżej 70 MW, opanowywała stosunek ciśnień 24.8 i temperaturę spalania 1150 °C. We wszystkich rozważanych wariantach turbina parowa składała się z części wysokoprężnej, pośredniej i niskoprężnej oraz stosowano oczyszczacz gazu, szczególnie z popiołu i związków alkalicznych. W przypadku reaktora wysokociśnieniowego stosowano ceramiczne filtry opracowane przez firmę Westinghouse, poprzednio wykorzystywane w „Programie czystych technologii węglowych”.

Analizę ekonomiczną przeprowadzono według cen obowiązujących w 1990 roku. Zakładano, że elektrownie będą lokalizowane w pobliżu centrum uprawy biomasy. Wyniki analizy ekonomicznej będą przedstawione w innym opracowaniu.

Zintegrowane układy gazyfikacji biomasy, turbiny gazowej i parowej obejmowały:

- przygotowanie paliwa i suszenie,
- gazyfikację i oczyszczanie gazu, w tym
 - układ podawania biomasy do reaktora gazyfikującego,
 - gazyfikator,
 - cyklon,
 - separator sadzy,
 - oczyszczacz gazu,
- jednostkę mocy, w tym:
 - turbinę gazową i generator prądu,
 - generator pary wykorzystujący ciepło odpadowe,
 - turbinę pary i generator prądu,
 - skraplacz, wieżę chłodniczą, układ zasilania w wodę.

Stosowano komorę spalania węgla drzewnego, zawierającego nie zgazyfikowany węgiel. Uzyskiwane ciepło wykorzystuje się we wstępnym podgrzewaczu pary i powietrza dostarczanego do gazyfikatora, a także do suszenia biomasy. W obecnie opracowywanym gazyfikatorze z bezpośrednio dostarczającym ciepłem zachodzi prawie zu-

pełna przemiana węgla w tlenek węgla, tak że komora spalania węgla drzewnego nie jest wymagana. W gazyfikatorze pośrednio ogrzewanym węgiel drzewny jest spalany w złożu fluidalnym, stanowiącym piasek, który cyrkuluje w obrębie reaktora. Gorący piasek jest źródłem ciepła w endotermicznym procesie gazyfikującym.

Drewno rozdrobnione do wymiaru 5 cm jest dostarczane transportem samochodowym do elektrowni, a jego cena wynosi 46 - 42 US\$/ tonę suchego drewna. Drewno jest składowane na terenie wybrukowanym, w ilości pokrywającej tygodniowe zapotrzebowanie. Rozdrobnione do rozmiaru 4 cm jest przenoszone do silosu na jeden dzień składowania. Pobierane z silosu podlega suszeniu i jest podawane do reaktora gazyfikującego. W zależności od rodzaju reaktora, dzienna podaż zawiera się w granicach 712 - 1620 ton suchego drewna. Suszarki drewna mają postać obracającego się bębna. W przypadku gazyfikatora z pośrednio dostarczonym ciepłem, do suszenia wykorzystuje się ciepło spalania węgla drzewnego w obecności powietrza. W obydwóch przypadkach produkty spalania miesza się przed wejściem do suszarki z powietrzem atmosferycznym w celu ochłodzenia gazu do temperatury 204 °C. Temperatura gazu na wylocie suszarki wynosi 80 °C. Temperatura osuszonego drewna wynosi 68 °C.

2.5.1 Gazyfikator wysokociśnieniowy zasilany powietrzem jako czynnikiem gazyfikującym

Jest to gazyfikator wysokociśnieniowy, o jednostopniowym złożu fluidalnym, z powietrzem jako czynnikiem gazyfikującym, bezpośrednio dostarczonym ciepłem. Został on opracowany przez Institute of Gas Technology (IGT), USA. Materiałem złoża jest tlenek glinu. Gazyfikator ten był eksploatowany, w różnym zakresie temperatur, ciśnienia, utleniacza i rodzaju paliwa, jako urządzenie pilotowe o małej przepustowości biomasy w USA, a także o dużej przepustowości w USA i w Finlandii.

Powietrze z małą ilością pary jest dostarczane do gazyfikatora w celu zapoczątkowania reakcji zgazowywania i spalania. Warunki pracy gazyfikatora wynoszą: temperatura 830 °C i ciśnienie 20 atm. Dalsze prace są prowadzone w celu polepszenia jakości gazu i zwiększenia przemiany węgla w stosunku do poprzednio uzyskiwanych danych. Wartość kaloryczna gazu wynosi 4.8 MJ/m³.

Schemat zintegrowanego układu gazyfikacji biomasy, turbiny gazowej i parowej z gazyfikatorem wysokociśnieniowym zasilanym powietrzem jako czynnikiem gazyfikującym przedstawiono w pracy [100]. Spalanie pyłu węgla drzewnego następuje w komorze spalania o złożu fluidalnym, dostarczając ciepło do gazyfikatora i podgrzewacza ciepła w cyklu parowym. Komora spalania działa przy temperaturze 843 °C. Przemiana węgla następuje w 99 %.

W oczyszczaczku gazu następuje kondensacja związków alkalicznych i schłodzenie gazu do temperatury 538 °C.

Związki alkaliczne obecne w gazie, stanowiącym bezpośredni produkt procesu zgazowywania, mogą powodować korozję części turbiny gazowej, głównie korozję łożek wirnika. Koniecznym więc staje się usunięcie tych związków jeszcze przed spalaniem gazu w komorze spalania. Zawartość związków musi być usunięta do poziomu poniżej 1 części na milion części gazu. Większość związków alkalicznych charakteryzuje się wysoką temperaturą skraplania. Dlatego schładzanie gazu do temperatury 538 °C zapewni znikomą obecność tych związków w gazie.

Chłodzenia gazu można dokonywać poprzez:

- bezpośrednio wstrzykiwania wody do gazu, co zmniejsza jego wartość kaloryczną, ale jest najprostszym i najtańszym rozwiązaniem,
- pośrednie chłodzenie gazu, wykorzystując odzyskane ciepło w cyklu parowym.

Pył z gazu wysokotemperaturowego może być usunięty za pomocą filtrów ceramicznych, dostępnych w handlu. Pozwalają one oczyszczać gaz z pyłów do poziomu akceptowalnego przez turbinę gazową.

2.5.2 Gazyfikator niskociśnieniowy zasilany powietrzem jako czynnikiem gazyfikującym z pośrednio dostarczanym ciepłem

Gazyfikator niskociśnieniowy zasilany powietrzem jako czynnikiem gazyfikującym z pośrednio dostarczanym ciepłem opracowany został przez Battelle Columbus Laboratory, USA, specjalnie do gazyfikacji biomasy. Różnica pomiędzy gazyfikatorem wysokociśnieniowym a niskociśnieniowym jest następująca. W pierwszym przypadku proces gazyfikacji zachodzi w atmosferze powietrza i pary, w drugim przypadku para jest wstrzykiwana z biomasą, aby zapoczątkować proces zgazowywania. W konsekwencji wartość kaloryczna gazu jest wyższa aniżeli w gazyfikatorze wysokociśnieniowym. Przed nawilżeniem gazu jego wartość kaloryczna wynosi 16.4 MJ/m^3 . Po nawilżeniu do 20 % wagi jego wartość kaloryczna spada do 14.2 MJ/m^3 . Ciepło reakcji endotermicznej zgazowywania jest dostarczane przez piasek cyrkulujący pomiędzy złożem fluidalnym komory spalania węgla drzewnego a zbiornikiem gazyfikatora.

Separator w kształcie cyklonu, w którym gaz ulega zawirowaniu i siły odśrodkowe odrzucają ziarna pyłu w stronę ścianek, jest stosowany dla usuwania pyłu. Związki alkaiczne są usuwane przez kąpiel wodną. Przed sprężaniem gaz jest chłodzony do temperatury $97 \text{ }^\circ\text{C}$. Dodatkowy filtr jest stosowany dla usuwania bardzo drobnych pyłów, nie usuniętych w separatorze.

Sprężania gazu dokonuje sprężarka odśrodkowa pięciostopniowa z międzystopniowym chłodzeniem, sprężając gaz od 1.72 do 20.68 atm. Po sprężeniu gaz jest ogrzewany do temperatury $371 \text{ }^\circ\text{C}$ ciepłem uzyskiwanym z komory spalania węgla drzewnego.

Podczas sprężania zawartość wody w gazie redukuje się do 7 % wagi. Zasilającym gazem układ mieszany turbiny gazowej i parowej uzyskuje się sprawność 35.67 %. Koszt energii elektrycznej wynosi $0.0576 \text{ } \$/\text{kWh}$. Zwiększając zawartość wody w gazie do 20 % uzyskuje się sprawność 35.40 % i koszt $0.0572 \text{ } \$/\text{kWh}$. Oznacza to, że nawilżanie gazu przed spalaniem zmniejsza nieznacznie sprawność i równocześnie zwiększa nieznacznie moc wyjściową. Zapotrzebowanie na biomasę zwiększa się jednak o 2 %.

4.2.5.3 Gazyfikator niskociśnieniowy zasilany powietrzem jako czynnikiem gazyfikującym z bezpośrednio dostarczanym ciepłem

Gazyfikator ten jest znany pod nazwą gazyfikator Studsvik. Był on zastosowany w Brazylii w projekcie finansowanym przez Bank Światowy. Gaz po oczyszczeniu jest sprężany do 18.6 atm. Schemat zintegrowanego układu niskociśnieniowej gazyfikacji biomasy, turbiny gazowej i parowej można znaleźć w pracach [100, 53].

Wszystkie urządzenia stanowiące układ mieszany turbiny gazowej i parowej są dostępne na rynku.

Gorący oczyszczony gaz o temperaturze $538 \text{ }^\circ\text{C}$ zasila sprężarkę osiową turbiny gazowej wspólnie z powietrzem sprężanym przez wysokociśnieniową sprężarkę turbiny. Zastosowano turbinę firmy General Electric LM5000PC, opanowującą stosunek ciśnień wynoszący 24.8 przy temperaturze na wejściu do turbiny wynoszącej $1150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Gaz opuszczający turbinę gazową jest przekazywany do generatora pary wykorzystującego ciepło odpadowe. Generator ten zawiera przegrzewacz, wysoko- i niskociśnieniową wytwornicę pary i podgrzewacz. Przegrzana para o parametrach $394 \text{ }^\circ\text{C}$ i ciśnieniu 5.3 MPa zasila gazyfikator i cykl parowy. Także para o ciśnieniu 1.4 MPa zasila cykl parowy.

W tablicy 7 zestawiono wybrane dane, charakteryzujące rozważane warianty zintegrowanych układów gazyfikacji biomasy i turbiny gazowej i parowej.

2.5.4 Uwagi końcowe

Zintegrowany układ gazyfikacji biomasy, turbiny gazowej i parowej pozwala uzyskać prawie dwukrotnie wyższą sprawność ogólną wytwarzania energii elektrycznej w porównaniu do elektrowni konwencjonalnej zasilanej mokrą biomasą. W dalszej części pracy zostanie wykazane, że zastąpienie komory spalania ogniwami paliwowymi, w których zachodzi „spalanie elektrochemiczne”, w przyszłości pozwoli uzyskać sprawność osiągającą 80 % i zmniejszyć koszty inwestycyjne do 400 \$/kW.

Tablica 7. Wybrane dane charakteryzujące rozważane warianty zintegrowanych układów gazyfikacji biomasy i turbiny gazowej i parowej [47]

| | Wysokie ciśnienie, bezpośrednie dostarczanie ciepła | Niskie ciśnienie, pośrednie dostarczanie ciepła | Niskie ciśnienie, bezpośrednie dostarczanie ciepła |
|-----------------------------------|---|---|--|
| Moc wyjściowa MW _e | 56 | 122 | 105 |
| sprawność % | 36.01 | 35.40 | 37.90 |
| Koszty inwestycyjne mln. \$/r | 1696.00 | 1108.00 | 1350.00 |
| Koszty energii elektrycznej \$/kW | 0.082 | 0.0655 | 0.0703 |

3 Uprawa biomasy jako czynnik ochrony środowiska

Uprawa biomasy może mieć bezpośredni lub pośredni wpływ na ochronę środowiska, przy czym może także oddziaływać w sposób negatywny. Oddziaływanie na środowisko ma charakter złożony. Wykorzystywanie biomasy do celów energetycznych musi być rozważane w kontekście alternatywnego źródła energii; rozpatrywanie jej jako płodu ziemi, musi uwzględniać aspekt wykorzystywania gleby.

3.1 Korzyści w skali globalnej

W skali globalnej największą korzyścią z uprawy biomasy może być substytucja paliw kopalnych, szczególnie węgla. Sprawność przetwarzania biomasy musi być konkurencyjna do paliw kopalnych. Będzie istniała możliwość znacznej redukcji emisji dwutlenku węgla, mającego dominujący wpływ na efekt cieplarniany. Będzie też istniała możliwość zlikwidowania zanieczyszczeń powietrza toksycznymi związkami ciężkich metali, tlenkami siarki, które przyczyniają się do powstawania kwaśnych deszczy.

3.2 Korzyści w skali lokalnej

Znaczących korzyści w skali lokalnej można byłoby oczekiwać zastępując biomasą - w miarę potrzeby - uprawy roślin przeznaczanych do konsumpcji, mało użyteczne pastwiska i zdegradowane gleby o odpowiedniej testurze. Do tych korzyści należy zaliczyć:

- zachowanie jakości wody, ponieważ biomasa wymaga znacznie mniej nawozów azotowych aniżeli tradycyjne uprawy, które także redukują możliwość emisji podtlenku azotu (N₂O), szczególnie przez gleby gliniaste [1, 55],
- możliwość osłabiania skutków powodzi i zmniejszania deficytu wody podczas okresów suszy,

- zapobieganie erozji gleby,
- poprawę lokalnego mikroklimatu (ochładzanie i nawilżanie powietrza w wyniku respiracji roślin),
- zmniejszenie zużycia nawozów sztucznych i środków ochrony roślin,
- poprawianie jakości gleby.

Plantacja biomasy wymaga stosowania mniej nawozów sztucznych, herbicydów i pestycydów w porównaniu z bardziej intensywną uprawą roślin tradycyjnych. Oznacza to, że plantacja biomasy może polepszać jakość wody, stanowiąc niejako filtr dla środków chemicznych upraw rolnych.

Ujemnych oddziaływań na lokalne środowisko można by było oczekiwać, gdyby naturalne obszary leśne były zastępowane krótkookresową uprawą biomasy. Aby minimalizować te skutki, należy zakładać plantacje biomasy na słabych lub bardzo słabych glebach użytków rolnych, na nieużytkach lub glebach skażonych. W wielu krajach jest zabronione zakładanie plantacji biomasy na obszarach leśnych. Wiele naturalnych lasów znajduje się na stosunkowo słabych glebach. Ich likwidacja względnie niszczenie uważa się za ubożenie środowiska w sensie likwidacji różnorodności natury i jakości środowiska. W USA sformułowano ostatnio zasady rozwoju zasobów biomasy [56]. Przedstawiono je poniżej:

- Rozwój systemu bioenergii musi wynikać ze spójnych decyzji i winien spełniać wiele celów ochrony środowiska, a także winien sprzyjać rozwojowi ekonomicznemu.
- Produkcja upraw energetycznych i ich przetwarzanie musi sprzyjać osłabianiu efektu cieplarnianego.
- Rozwój i zarządzanie zasobami biomasy powinno ochraniać, gdziekolwiek jest to możliwe, i wzmacniać różnorodność natury.
- Rozwój i zarządzanie zasobami biomasy winno stymulować ciągłe dochody producentów, lokalnych samorządów i gospodarki narodowej.

Literatura

- [1] Borjesson Pal, Biomass in a Sustainable Energy System, Lund University, Sweden, 1998.
- [2] Christersson Lars, Deciduous Tree Species for Energy, Fibre and Purification of Wastewaters, Materiały Konferencji Polish-Swedish workshop in Starbienino, 25-28,05, 1997 Polska.
- [3] Ciechanowicz W., Energia, Środowisko i Ekonomia, Instytut Badań Systemowych PAN, 1-wsze wydanie 1995, 2-gie wydanie 1997.
- [4] Foran B., Mardon Ch., Beyond 2025: Transitions to a Biomass-Alcohol Economy Using Ethanol and Methanol, Working Paper Series 99/07, December 1999.
- [5] Rosenberg T.L., Biomass Energy, America's Secret Renewable Energy Resource, Renewable Energy Experts & Advocates, 1997.
- [6] Ciechanowicz W. et al, Problems of Economy, Energy, Water Management and Environment in the Simulation of the Sustainable Development of Regions with the Majority of Rural Areas, International Meeting „IIASA days in Ukraine”, Kiev, March 1999.
- [7] Perlack R.D., Short Rotation Intensive Culture for Production of Energy Feedstocks in the US; a review of experimental results remaining obstacles to commercialization, Biomass, No. 2, str. 145-159, 1986.
- [8] Krantz B., Woodfuel independence, Materiały Konferencji CONF-830622, Minneapolis, USA, 1.6.1983.

- [9] Bioenergy, Background Paper 2, FAO/Netherlands Conference on the Multifunctional Character of Agriculture and Land, 2000.
- [10] Biomass Energy in Selected Industrial Countries , Vol. 12 No. 2, October 1997.
- [11] Proakis G.J., Vasselli J.J., Neuhauser E., Volk T.A., Accelerating the Commercialization of Biomass Energy Generation Within New York State, New York State Technology Enterprise Corporation, Rome, NY 13441.
- [12] Volk T. A., et al, Developing a Willow Biomass Crop Enterprise for Bioenergy and Bioproducts in the United States, Bioenergy 2000, October 15-19, 2000.
- [13] Abrahamson, L. P., et al, Evaluating Hybrid Popular Clonal Growth Potential in a Three-years Old Genetic Selection Field Trial. Biomass 21:101-114, 1990.
- [14] Kopp R. F., et al, Willow biomass trials in central New York States. Biomass and Bioenergy 5(2):179-187, 1993.
- [15] Volk T. A., et al Producing Short-Rotation Willow Crops in the Northeast United States, Proc. of Second Short-Rotation Wood Crops Operations Working Group Conferences, Portland, August 24-28, 1998.
- [16] Armstrong A. C., et al, Effects of spacing and cutting cycle on the yield of poplar grown as an energy crop. Biomass and Bioenergy 17:305-314, 1999.
- [17] Kenney W.A., et al, Willow biomass prototype farms of the University of Toronto: Status and future plans, Proc. of Canadian Energy Plantation Workshop, Gananoque, Ontario, May 2-4, 1955.
- [18] <http://www.chem.uu.nl/nws/www/publica/97046sum.htm>
- [19] Pohjonen V., Short rotation forestry, Materiały Konferencji CONF-8311266, Wiedeń, Austria, 14.11.1983.
- [20] Salk M.S. Folger A.G., Potential for growing terrestrial energy crops in the Southwest United States, Materiały Konferencji CONF-860405-2, Washington, 07.04.1986.
- [21] Perlack R.D. Determination of the Potential Market Size and Opportunities for Biomass to Electricity Projects in China, Proc. Second Biomass Conference of the Americas: Energy, Environment, Agriculture, and Industry, Portland, Oregon, 1995.
- [22] Kopp R.F., et al, Willow Biomass Produce's Handbook, New York State Energy Research and Development Authority, Corporate Plaza West, Washington, 1997.
- [23] Perlack R.D., et al, Biomass Fuel from Woody Crops for Electric Power Generation ORNL-6871, USA, 1995.
- [24] Agrobtransle AB, Box1743, Orebo, Swecja.
- [25] Perlack R.D., et al, Biomass energy development in Yunnan Province, China: Preliminary Evaluation ORNL/TM-11791, 1991 Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tm.
- [26] Hoagland W., Overview of engineering research on acid hydrolysis processes, SERI/CP-231-2726, USA, 1985.
- [27] Barrier J.W., Farina G.E., Ethanol from cellulosic agricultural feedstocks, SERI/CP-231-2726, USA, 1985.
- [28] Barrier J.W., et al, Acid hydrolysis experimental facility results with corn stoves, Materiały Konferencji CONF-8506232-1, East Lansing, USA, 23.06.1985.
- [29] Canale-Parola E., Conversion of cellulose to ethanol by mesophilic bacteria, DOE/ER/10878-T3, USA, 1986.
- [30] Hagler R.W., Stahr J.J. Technical and economic feasibility of enzyme hydrolysis for ethanol production from wood, NYSERDA-85-9, USA, 1985.
- [31] Hahn-Haegerdal B., et al, Bioconversion of cellulose to ethanol, STEV-BF-85-12, Swecja, 1985.

- [32] Wright J.D., et al, Design and Parametric Evaluation of an Enzymatic Hydrolysis Proces, SERI/TP-231-2975, USA, 1986.
- [33] Tilche A., Complete Census of the Anaerobic Digesters Today Operating in Italy on Animal Waste, ENEA-RT/FARE-SIN-83-3, Wlochy, 1983.
- [34] Production of methane, ethanol, single cell protein and fertilizer via solar distillation, DOE/R4/10340-T1, USA, 1980.
- [35] Di Giorgio G., et al, Production of Ethanol by Immobilized Living Yeast Cells, ENEA-RT/BIO-82-25, Wlochy, 1982.
- [36] Di Giorgio G., et al, Production of Ethanol from Municipal Solid Wastes (MSW) by Immobilized Groving Yeast Cells, ENEA-RT/BIO-82-26, Wlochy, 1982.
- [37] Gonzales I.L., Aerobic Ethanol Production with a Flocculent Yeast in a Biomass Recycling System, NP-6770155, Szwajcaria, 1985.
- [38] Wyman C.E., The DOE/SERI Ethanol from Biomass Program, SERI/TP-231-3996, pp.3-19, Solar Energy Research Institute, Golden, USA, 1991.
- [39] Peck H.D., Ljunghdal L.G., Microbiology and Physiology of Anaerobic Fermentation of Cellulose, DOE/ER/10499-7, USA, 1986.
- [40] Rivard C., et al, Anaerobic Digestion of Hemicellulosic Feedstocks, ANL/ CNSV-TM-167, USA, 1985.
- [41] Schoenheit P., Thauer R.K., Metabolism of H₂ and CO₂ by methanobacterium, ANL/CNSV-TM-167, USA, 1985.
- [42] Hayes T.D., Isaacson H.R., New Concept for the Production of High BTU Gas from Anaerobic Digestion, ANL/CNSV-TM-167, USA, 1985.
- [43] Biological Production of Fuels from Coal Derived Gases, DOE/PC/80012-T3, USA, 1986.
- [44] Lamare L., Electricity from Whole Trees, EPRI Journal, January/February 1994.
- [45] EPS, Anew Electrical Generation Technology Has Now Arrived, Energy Performance Systems, Mineapolis, 1993.
- [46] Badin J., Kirschner J., Biomass greens US power production, Renewable Energy World, V 1, No 3, November, 1998.
- [47] Craig J.D., Development of a Small Scale Biomass-Fueled Integrated-Gasifier Gas Turbine Power Plant: Phase I, Western Regional Biomass Energy Program, Golden Colorado. 1996.
- [48] Wiant B., Larkin J., Onischak M., Hawaiian Biomass Gasification Commercialization Program, Proc. Of the Third Biomass Energy Conference of the America, Montreal, Canada. 1997.
- [49] Skog E., Biomass Gasification Combined-Cycle Power Plant Demonstration in Varnamo, Sweden, Presented at The EPRI Strategic Benefits of Biomass and Waste Fuels Conference, Washington, DC. 1993.
- [50] McKeough P., Kurkela E., Biomass Gasification Activities in Finland, Presented at The EPRI Strategic Benefits of Biomass and Waste Fuels Conference, Washington, DC. 1993.
- [51] DeLong M., M., et al, Sustainable Biomass Energy Production and Rural Economic Development Using Alfalfa Feedstock, Proc. of the Second Biomass Energy Conference of the Americas, Portland, Oregon, 1995.
- [52] Mantiatis K., Frero G., L., The Thermie Target Projects on Biomass Gasification, Proc. of the Second Biomass Energy Conference of the Americas, Portland, Oregon, 1995.
- [53] Craig K. R., Mann M. K., Cost and Performance Analysis of Three Integrated Biomass Gasification Combined Cycle Power System, http://www.eren.doe.gov/biower/bplib/Library/li_snowpapr.htm

- [54] Breault R., Morgan D., *Design and Economics of Electricity Production from an Indirectly Heated Biomass Grassfire*, TR4533-049-92, Columbus, OH: Battelle Memorial Institute.
- [55] Okken P.A., van Doorn J., *Biomass Bioenergy* 5, 121, 1993.
- [56] National Biofuels Roundtable, *Principles and Guidelines for the Development of Biomass Energy Systems: Draft Final Report*, Available from R. Overend, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, 1994.
- [57] O'Connell R., *Fuel Cells, Revolutionary technology from the 19th Century*, February 2000.
- [58] Angrist W.S., *Direct Energy Conversion*, Third Edition, Allyn and Bacon, Inc. Boston, MA.
- [59] Appleby A.J., Foulkes F.R., „*Fuel Cell Handbook*“, Van Nostrand Reinhold, New York
- [60] Hirschenhofer J.H., Stauffer D.B., Engelman R.R., Klett M.G., *Fuel Cell Handbook*, fourth edition, DOE/FETC-99/1076, November 1998.
- [61] Cameron D.S., *World developments of fuel cells*, Int. J. Hydrogen Energy, Vol.15, No 9, str. 669-675, 1990.
- [62] Appleby A.J., *Coal Gasification in Fuel cell Application*, Energy 12, Chapter 6, 1987.
- [63] *Communications with IFC*, September 21, 1998. Fuel cells Canaccord T.H. February 2000.
- [64] Hirschenhofer J., *Latest Progress in Fuel Cell Technology*, IEEE-Aerospace and Electronic Systems Magazine, 7, November, 1992.
- [65] Hirschenhofer J. H., *Status of Fuel Cell Commercialization Efforts*, American Power Conference, Chicago, IL, April 1993.
- [66] Giordano N., et al, *Catalyst and Electrochemistry in PAFC: A Unifying Approach: in The International Fuel Cell Conference Proceedings*, NEDO/MITI, Tokyo, Japan, 1992.
- [67] Roland B., Sccholta J., Wendt, *Phosphoric Acid Fuel Cells-Materials Problems, Process Techniques and Limits of the Technology*, in *The International Fuel Cell Conference Proceedings*, NEDO/MITI, Tokyo, Japan, 1992.
- [68] Lindstrom O., *That incredible*, part 1, Chemtech August 1988, *Fuel cell power plants*, part 2, Chemitech September 1988, *Muscles, engines, and fuel cells*, part 3, Chemitech, November 1988, *Fuel cell markets a look at economics and commercial installations*, part 4, Chemitech January 1989.
- [69] *Electrochemical energy conversion and storage*, Reports from Conferences, *Chimia* 43 (Schweizerischer Chemiker Verband), No 7-8, 1989.
- [70] Bajura R.A., *Fuel Cells: Simple Solutions in a Complicated World*, NETL Proceedings of Joint Fuel Cell Technology Review Conference, August 1999, Chicago, USA.
- [71] Chubb L. *Fuel Cells, the Next Generation: Lean, Mean and Clean*, in *Environmental News Network*, January 15, 2000.
- [72] Thomas S., Zalbowitz, *Fuel Cell - Green Power*, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-99-3231.
- [73] Wiens Ben I. *The Future of Fuel Cells*, 12 Dec. 1999, Ben Wiens Science site www.benwiens.com.
- [74] Pearson W., *Tree Plantations: Australia's Future Fuel Source ?*, in *Environmental News Network*, August 24, 2000.
- [75] *Looking Beyond The Internal Combustion Engine „The Promise of Methanol Fuel Cell Vehicles*, American Methanol Institute, www.methanol.org.

- [76] Fax Transmittals from Robert Petkus, MC Power, to David Stauer, Parsons Energy & Chemicals, July 2 and July 7, 1998.
- [77] BevcF.P., Lundberg W.L., Bachovchin D.M., Solid Oxide Fuel Cell Combined Cycles, ASME Paper 96-GT-447, presented at International Gas Turbine and Aeroengine Congress & Exhibition, Birmingham, UK, June 1996.
- [78] Hendricks R., Heron Turbine Prototype Test Results, 20th International Congress on Combustion Engines, International Council on Combustion Engines (CIMAC), London, 1993.
- [79] George T.J., Lyons K.D., James II R., Multistaged Oxide Fuel Cell Power Plant Concept, May 1998.
- [80] Fusion energy applied to synthetic fuel production, prepared by L.A. Booth Panel Chairman Los Alamos Scientific Laboratory, CONF-770593, 1977.
- [81] Anderson C.A., et al, Production of synthetic gas from nuclear energy sources, LA-7592-MS, 1979.
- [82] Bedingungen und folgen von aufbaustrategien für eine solar wasserstoff-wirtschaft, Untersuchung für die Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages "Technikfolgen-Abschätzung und -Bewertung", Ottobrunn, RFN, 1990.
- [83] Funk J.E., A Technoeconomic Analysis of Large Scale Thermochemical Production of Hydrogen, EPRI EM-287, 1976.
- [84] Steinberg M., et al, BNL 18866, 1974.
- [85] King Hubert M., Resources and Man, National Academy of Science-National Research Council, Freeman W.H. et al, San Francisco, 1969.
- [86] Contributions to Hydrogen Energy Technology on the Occasion of the ISES Solar World Congress 1087, Hamburg, wrzesień 13-18, 1987.
- [87] Reihm T., Wood hydrolysis by the Udic-Rheinau Process, FAO Technical panel (Working Party of Wood Hydrolysis) 1960.
- [88] Dong Y.J., Steinberg M., HYNOL: An economical process for methanol production from biomass and natural gas with reduced CO₂ emission, International Journal of Hydrogen Energy, 22,10/11, 1997.
- [89] Gracia L., et al. Development of coprecipitated nickel-alumina catalysts for pyro-catalytic gasification of biomass, 9-th European Bioenergy Conference and 1st European Energy from Biomass Technology Exhibition June, Copenhagen.
- [90] www.ballard.com/print.asp:
- [91] Bruno L., Red Hwrring Magazine, Top Ten Trends 2001, Trend number nine: Energy, December 04, 2000, <http://www.redherring.com/mag/issue86/mag-energy-86.html>
- [92] American Methanol Institute, AMI, Methanol Buses Return to Los Angeles, <http://www.methanol.org/altfuel/press/pr980120.html>
- [93] American Methanol Institute, AMI, Methanol Fuel Cell Bus Visit Florida, <http://www.methanol.org/fuelcell/press/pr9711209.html>
- [94] American Methanol Institute, AMI, Methanol Fuel Cells: Practical Power, <http://www.methanol.org/fuelcell/fact/fcells.html>
- [95] American Methanol Institute, AMI, The Promise of Methanol Fuel Cell Vehicles, http://www.methanol.org/fuelcell/special/promise_summary.html
- [96] Contadini, AMI, Social Cost Comparison Among Fuel Cell Vehicle Alternatives, http://www.methanol.org/fuelcell/special/contadini_pgl.html
- [97] Milliken J., The DOE Transportation Fuel Cell Program: Recent Accomplishments and Future Plans, Office of Transportation Technologies US Department of Energy, 1000 Independence Avenue, SW Washington, DC 20585 USA.

- [98] Geyer B., Fuel Cells 2000, Washington DC, USA, Developments in Fuel Cell Technology, Sustainable Developments International.
- [99] www.daimlerchrysler.com/news/top/2000/t00406_e.htm.
- [100] Ciechanowicz W., Bioenergia a energia jądrowa, Wyższa Szkoła Informatyki Stosowanej i Zarządzania, 2001.

