

Rośliny energetyczne i urządzenia dla przetwarzania i spalania biomasy

Artykuł powstał przy współpracy z Mieczysławem Grzesikiem - Instytut Ogrodnictwa w Skierniewicach oraz Beatą Z. Romanowską-Dudą - Uniwersytet Łódzki.

Wprowadzenie

Po przyjęciu proekologicznych dokumentów politycznych i rozwiązań prawnych w ostatnich latach szybko wzrasta rola odnawialnych źródeł energii, która przede wszystkim jest ukierunkowana na wykorzystanie biomasy, jako składnika bilansu energetycznego państwa. Udział biomasy w produkcji energii stał się również ważny z punktu widzenia redukcji emisji gazów cieplarnianych, poprawy bezpieczeństwa energetycznego i wspierania rozwoju społeczno – gospodarczego. Zgodnie z danymi Europejskiego Centrum Energii Odnawialnej przewiduje się, że ze wszystkich rodzajów OZE, energia pochodząca z biomasy będzie stanowiła 70-90%. W tej ilości, biomasa pochodząca z upraw roślin energetycznych stanowić będzie około 70%. Pozostałe 30% to biomasa, która obecnie jest wytwarzana, ale jeszcze nie jest dostatecznie zagospodarowana. Dotyczy to głównie pozostałości pożniwnych zbóż i rzepaku (słoma), resztek drewna po wyrębach w lasach oraz biomasy z usuwanych drzew przydrożnych lub z likwidowanych plantacji krzewów lub sadów. Elektrownie i elektrociepłownie wykorzystujące głównie węgiel kamienny i brunatny jako paliwa podstawowe w ogólnym bilansie energetycznym w znacznej mierze przyczyniają się do zanieczyszczenia środowiska naturalnego oraz mają duży wpływ na zaburzenie efektu cieplarnianego. Dyrektywa Unii Europejskiej, która nakazuje krajom członkowskim udział odnawialnych źródeł energii w ich ogólnym bilansie energetycznym, określiły 20% redukcję emisji CO₂, wprowadzenie 20% udziału OZE oraz poprawę efektywności energetycznej o 20% na kolejne 10 lat i realizacja planu na rok 2020, zakładająca 15% udział OZE w całkowitym bilansie zużycia energii.

Zasoby paliw kopalnych ulegają wyczerpaniu natomiast biomasa drzewna stanowiąca 90% całej biomasy na Ziemi nie licząc biomasy bakteryjnej, stanowi obiecujące źródło energii alternatywnej dla węgla. Niestety zasoby biomasy są bardzo często rozproszone, jej ilość jest uzależniona od czynników pogodowych i bardzo często infrastruktura transportowa jest bardzo słabo rozwinięta [1]. Swoją dobrą pozycję wśród paliw wykorzystywanych w energetyce biomasa zawdzięcza przede wszystkim faktowi, że uzyskanie energii cieplnej i elektrycznej z biomasy nie jest procesem wysoce kapitałochłonnym. Istnieje wiele technologii wykorzystania biomasy, którą łatwo przetwarza się do stałej, płynnej lub gazowej postaci. Z energetycznego punktu widzenia zasoby biomasy można podzielić na dwie grupy, pierwszą grupę stanowią nośniki energii w fazie stałej, które mogą ulegać procesowi spalania, pirolizy, a także tlenowo-parowego zgazowania do mieszaniny dwutlenku i tlenku węgla, metanu i wodoru. Taki gaz można zamienić w energię cieplną i elektryczną, wykorzystując technologie dobrze poznane, ale także do metanolu wg. technologii Fischera-Tropscha. W drugiej grupie znajdują się te zasoby, które można przetwarzać w paliwa płynne i biogaz, będący przede wszystkim mieszaniną metanu i dwutlenku węgla [2].

Przewiduje się, że w najbliższej przyszłości istotnym uzupełnieniem bilansu podaży biomasy stałej na rynku energetycznym będą wieloletnie plantacje roślin energetycznych zakładane i prowadzone na gruntach rolnych. Dotychczasowe dane literaturowe i zalecenia praktyczne wskazują więc na możliwość uprawy roślin energetycznych na glebach średniej jakości oraz w dotychczas panujących warunkach pogodowych. Produkcja biomasy na użytkach rolnych w Polsce może się odbywać na części gruntów, na których zaprzestano uprawy roślin konsumpcyjnych (odłogi i ugory) oraz na gruntach nieprzydatnych do uprawy roślin żywnościowych. Możliwości uprawy roślin energetycznych w zmieniających się warunkach klimatycznych oraz na glebach słabych nie są wystarczająco znane. Podejmowane ostatnio badania wskazują, że niekorzystny wpływ warunków klimatycznych na wzrost roślin może być zmniejszony poprzez zastosowanie trzykrotnej, dolistnej aplikacji preparatów Biojodis lub Asahi SL lub wodnych monokultur Cyanobacteria. Zastosowanie

uszlachetnionych osadów z oczyszczalni miejskich oraz wymienionych biostymulatorów wzrostu umożliwia również uprawę roślin energetycznych na glebach bardzo słabych, zdegradowanych oraz na użytkach rolnych odłogowanych lub mało intensywnie wykorzystanych rolniczo. Ich powierzchnia w Polsce wynosi ok. 1,6-1,8 mln hektarów. Użytki te w znacznej części są glebami mało urodzajnymi i większość z nich powinna nadawać się pod uprawę roślin energetycznych, które przy prawidłowej agrotechnice i nawożeniu, mogą zapewnić zadawalające plony biomasy (Cogaliastro i in. 2001, Benito i in. 2005, Grzesik i in. 2007, Romanowska-Duda i in. 2007, Grzesik i Romanowska-Duda 2008, Grzesik i in. 2009).

Jednym z ważniejszych problemów w produkcji roślin energetycznych staje się dobór tych gatunków, które mogą rozwijać się w zróżnicowanych warunkach glebowych i środowiskowych zmieniającego się klimatu, być wykorzystywane wielokierunkowo i wytwarzają dużą ilość biomasy łatwej do przerobienia na energię. W warunkach globalnych zmian klimatycznych poszukuje się więc takich roślin energetycznych, które mogłyby być uprawiane w zróżnicowanych warunkach pogodowych, łatwo adaptowały się do warunków lokalnych, nadawały się do zagospodarowania wszystkich terenów i jednocześnie mogły być wykorzystane w rekultywacji zdegradowanych terenów przemysłowych i fitoremediacji. Szczególnie przydatne są te rośliny, które wytwarzając duży plon, mogą być uprawiane na glebach niskiej jakości nie konkurując z produkcją roślin przeznaczonych na cele spożywcze (Grzesik, Romanowska-Duda 2008, 2009a, 2009b, Grzesik i in. 2009).

Do tej pory w Polsce znaczna ilość działań w zakresie pozyskiwania bioenergii skupiała się na pozyskiwaniu energii z wierzby wiciowej, której monokulturowa uprawa mogłaby w przyszłości naruszyć równowagę w ekosystemie i doprowadzić do degradacji środowiska. Istnieje obawa, że w związku z globalnymi zmianami klimatycznymi mogą wystąpić nieprzewidywalne zmiany w plonowaniu roślin i problemy agrotechnologiczne, co może doprowadzić do zmniejszenia ilości pozyskiwanej biomasy i zachwiania całego systemu energetycznego. Dlatego proponuje się rozszerzenie asortymentu biomasy roślinnej o wiele innych gatunków roślin, które wytwarzają dużą ilość suchej biomasy na glebach niskiej jakości, mają właściwości fitoremediacyjne, są odporne na stres temperatury i suszy oraz mogą być także wykorzystane w innych celach niż energetyczny (Grzesik, Romanowska-Duda 2006, 200, Romanowska-Duda i in. 2004, 2007).

Uprawa roślin energetycznych powinna obejmować więc jak najwięcej gatunków dostosowanych do zróżnicowanych warunków klimatyczno-glebowych. Zwiększenie różnorodności biologicznej przyczyni się do zachowania równowagi ekologicznej a przez to do ograniczenia rozprzestrzeniania się chorób i szkodników, które z łatwością atakują rozległe monokultury rolnicze i leśne (Majtkowski 2003). Zestaw roślin możliwych do uprawy na cele energetyczne w polskich warunkach obejmuje kilkadziesiąt gatunków ale większość z nich jest nadal mało znana w naszym kraju. Spośród roślin wieloletnich gatunkiem najbardziej popularnym i przebadanym do uprawy w Polsce jest nadal wierzba wiciowa (*Salix viminalis*). Duże nadzieje wiąże się także z wieloma innymi gatunkami uprawianymi w cyklu wieloletnim, w tym: topole, róża wielokwiatowa, ślazowiec pensylwański, topinambur (słonecznik bulwiasty), sylfia, rdest, a także jednoliścienne rośliny energetyczne z uwzględnieniem miskanta olbrzymiego, prosa różgowatego, spartiny preriowej, kukurydzy oraz dużej liczby gatunków zbóż i traw wieloletnich. Rośliny tych gatunków wytwarzają stosunkowo dużą biomasę, zazwyczaj korzystnie wpływają na strukturę i żyzność gleby, kształtują stosunki wodne i absorbują silnie substancje. Niektóre z nich są dość odporne na istniejące niesprzyjające warunki środowiskowe, dobrze rozwijają się w zmieniającym klimacie oraz zmiennych warunkach pogody i gleby, w porównaniu do wierzby, której rozwój pod wpływem tych czynników trudno obecnie ocenić (Majtkowski 2003).

Rośliny energetyczne

Wierzba wiciowa (*Salix viminalis*)

Wierzba wiciowa jest powszechnie uprawianą rośliną energetyczną, której alternatywą lub uzupełnieniem powinny być inne rośliny. Wierzba energetyczna to gatunek krzewiasty osiągający wysokość do 8 m. Cechą charakterystyczną tej odmiany jest niezwykle silny wzrost. W korzystnych warunkach, zwłaszcza dużej wilgotności gleby i obfitym nawożeniu, roślina ta wyrasta w jednym sezonie do wysokości 3 m. Produkcja prawidłowo założonej plantacji powinna trwać co najmniej 15-20 lat z możliwością 5-8-krotnego pozyskiwania drewna w ilości 10 -15 ton s.m./ha/rok, a w sprzyjających warunkach nawet 26 t/ha. Problemem jest wysoka wilgotność biomasy (50-60%) w chwili zbioru, co zmusza do suszenia jej przed spalaniem. Zawartość popiołów przy spalaniu wynosi około 1% spalanej masy, podczas gdy przy spalaniu gorszych gatunków węgla zawartość ta sięga do 20%. Wartość energetyczna jednej tony suchej masy drzewnej wynosi 4,5 MWh, co odpowiada wartości kalorycznej jednej tony niskiej jakości miału węglowego lub 500 litrom oleju opałowego (Grzybek i in. 2001). Drewno wierzby krzewiastej może być także surowcem do produkcji biometanolu. Wierzba posiada także właściwości fitoremediacyjne i może być wykorzystana w oczyszczaniu gleb z metali ciężkich i innych związków toksycznych. (Hałuzo i in. 2004). Rośnie do 10 razy szybciej niż sosna czy świerk a z ekonomicznego punktu widzenia jej uprawa do celów energetycznych na gruntach ornych jest bardziej opłacalna niż uprawa jęczmienia jarego i pszenicy ozimej (Stolarski 2004). Wierzba wiciowa najlepiej rośnie na terenach podmokłych i wymaga intensywnego nawożenia, mogącego prowadzić do skażenia gleby i eutrofizacji wód. Do uprawy mogą być wykorzystane prawie wszystkie grunty, jednak wysokie plonowanie biomasy (od 12 do 15 ton/ha/rok) uzyskuje się na gruntach ornych III i IV klasy bonitacyjnej o odczynie (pH) 5,5 – 7,5. Może rosnać też na gruntach klasy V pod warunkiem, że ziemia jest wilgotna od marca do października, lecz nie zabagniona i odpowiednio nawożona (Szczukowski i in. 2004). We wczesnym okresie wegetacji akumuluje ona duże ilości węgla w łodygach. Najkorzystniejsze jest wycinanie roślin w odstępach 3-5 letnich. Według Szczukowskiego i Budnego (Szczukowski, Tworowski 2006, 2009, Dom Doradztwa Biznesowego 2007) najbardziej przydatnymi klonami są m.in.: *Salix viminalis* 082, *Salix viminalis* var. *Gigantea*, *Salix viminalis* 052, *Salix viminalis* 051 oraz *Salix viminalis* 'Piaskówka', których plon świeżej biomasy roślin dwuletnich może wynieść odpowiednio: 74,13; 60,30; 70,30; 59,98 i 52,34 ton/ha. Metody uprawy wierzby wiciowej na glebach średniej klasy są powszechnie znane. Uprawa jej możliwa jest również na glebach bardzo słabych ale wzbogaconych przerobionymi osadami z oczyszczalni przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniej wilgotności gleby, gdyż susza może spowodować spadek plonowania nawet o 50%. (Cogaliastro i in. 2001, Hałuzo i in. 2004, Benito i in. 2005, Grzesik i n. 2007, Romanowska-Duda i in. 2007, Grzesik i Romanowska-Duda 2008).

Topola (*Populus* sp.)

Topola jest najszybciej rosnącym drzewem w naszych warunkach klimatycznych i posiada zbliżone znaczenie użytkowe i środowiskowe jak wierzba. Najwyższy plon biomasy wytwarza w warunkach występujących w dolinach rzek i zbiorników wodnych. Wymagania glebowe topoli są podobne jak wierzby. Najczęściej biomasa pozyskiwana jest w cyklu 4-6 letnim, a jej plon wynosi 6-12 t/ha. W Polsce polecany do uprawy jest szybko rosnący mieszaniec osiki szwedzkiej i osiki amerykańskiej, który nadaje się do uprawy na dobrze nawodnionych nieużytkach i gruntach zdegradowanych (Majtkowski 2003). Innym mieszańcem polecanym do nasadzeń na plantacjach energetycznych jest wyhodowana w Polsce topola bujna, która w krótkim okresie wytwarza biomasę porównywalną do wierzby i jest odporna na choroby. Drzewa ścina się co 3-4 lata (Jabłoński 2002, 2004, Hałuzo i in.

2004).

Róża wielokwiatowa (*Rosa multiflora*)

Rośliny róży wielokwiatowej to wysokie, ekspansywne i szeroko rozrastające się krzewy, dorastające do wysokości 4-6 m. Plon biomasy zbieranej w październiku wynosi 10 –15 t/ha. Biomasa ta może być brykietowana, spalana lub zgazowywana. Róża ta rośnie dobrze na glebach słabych nawożonych osadami pościekowymi. Mieszkańcowa odmiana JART, bezkolcowa i silnie odrastająca, może być uprawiana na piaskach i ubogich piaszczystych glebach klasy V i VI. Jest ona wytrzymała na suszę, silnie rośnie na osadach pościekowych, a plon biomasy wynosi 20 t/ha (Jabłoński 2002, 2004, Podbielkowski, Sudnik-Wójcicka 2003).

Ślazier pensylwański (*Sida hermaphrodita*)

Ślazier pensylwański jest jedną z perspektywicznych roślin, które podobnie jak wierzba, mogą być wykorzystywane do celów energetycznych. Nadaje się do uprawy w klimacie Polski, na glebach średniej i niskiej jakości włącznie z piaszczystymi klasy piątej i nieużytkach. Może też być stosowany do rekultywacji terenów zdegradowanych. Formy ślazierca mniej ulistnione (tzw. łodygowe) są bardziej przydatne do spalania, natomiast formy obficiej ulistnione bardziej nadają się do produkcji biogazu. Roślina ta posiada także inne zastosowanie – m.in. jest rośliną miododajną, może też być uprawiana na paszę, włókno, i jako surowiec w przemyśle celulozowego – papierniczym. Plantacja ślazierca może być użytkowana przez okres 15-20 lat. Z 1 ha można uzyskać do 15 ton suchej biomasy, z czego 6,7 ton stanowi celuloza (Majtkowski 2003). Ciepło spalania cienkich łodyg ślazierca wynosi 14,5 MJ/kg, a grubszych łodyg 11,9 MJ/kg. W bardzo sprzyjających warunkach plon zbieranej zimą masy roślinnej wynosi 20-25 ton/ha, a jej wilgotność w czasie zbioru waha się w granicach 20-25%. Z tego względu może być bezpośrednio po zbiorze spalana, bez suszenia, co obniża koszty pozyskiwania energii. Problemem jest stosunkowo wysoka zawartość popiołu, 14,7-16,6% suchej masy. Rozmnaża się z nasion, które kiełkują nierównomiernie i w niskim procencie. Kondycjonowanie nasion przyspiesza kiełkowanie i zwiększa odsetek wschodzących siewek (Majtkowski 2003, Grzesik, Romanowska-Duda 2009b).

Słonecznik bulwiasty (topinambur; *Helianthus tuberosus*)

Słonecznik bulwiasty jest bardzo interesującą rośliną energetyczną, która może być wykorzystywaną do produkcji dużej ilości biomasy (część nadziemna) oraz biopaliw (wykorzystując bulwy). Topinambur jest rośliną o bardzo wysokim potencjale produkcyjnym. Wysokość plonów uwarunkowana jest przede wszystkim genotypem roślin, ale istotny wpływ ma również żyzność gleby. Plon biomasy może wynieść nawet 110 t/ha, w tym: zielonej masy 75,6 t/ha, a bulw 32,4 t/ha (Stolarski 2004). Surowcem do celów energetycznych mogą być bulwy, które można przeznaczyć do produkcji etanolu lub biogazu oraz części nadziemne. Ze świeżych lub zakiszonych pędów może być wytwarzany biogaz, natomiast suche mogą być spalane lub wykorzystane do produkcji brykietów opałowych i peletów. Topinambur rośnie dobrze i wytwarza dużą biomasę w szerokim zakresie warunków. Najlepiej udaje się na glebach średnio zwięzłych, przewiewnych, zasobnych w składniki pokarmowe i dostatecznie wilgotnych. Może być także uprawiany na gorszych stanowiskach, zwłaszcza jeżeli jest stosowane nawożenie uzdatnionymi odpadami ściekowymi (Majtkowski 2003, Stolarski 2004, Romanowska-Duda i in. 2007, Romanowska-Duda, Grzesik 2010).

Sylfia, różnik przerośnięty (*Silphium perfoliatum*)

Sylfia, to trwała roślina dwuliścienna charakteryzująca się niewielkimi wymaganiami glebowymi. Z tego względu może być polecana jako roślina pionierska przy rekultywacji terenów zdegradowanych. Pędy sylfii osiągają wysokość do 2,5 m. Jej plantacje energetyczne zakłada się późną jesienią (X-XI) wysiewając nasiona bezpośrednio do gruntu. Po upływie 3-4 lat z plantacji można uzyskać około 100 t biomasy z ha (ok. 19 t s.m./ha). Sylfia stanowi jednocześnie cenną roślinę miododajną, leczniczą oraz pastewną (Majtkowski 2003).

Rdest japoński (*Reynoutria japonica*) i rdest sachaliński (*R. sachalinensis*).

Rdesty to bardzo szybko rosnące rośliny, dorastające do 6 m wysokości. Jednoroczne pędy dorastają do 4 m. W warunkach Polski rdesty rozpoczynają wegetację w kwietniu-maju a wegetację kończą wraz z nastaniem pierwszych przymrozków. Ścinane jesienią lub zimą pędy zawierają 32-36% wody i z tego względu przez spalaniem lub przygotowaniem do zgasowywania nie wymagają dosuszania. Problemem jest to, że rdesty nie nawożone szybko wyjaławiają glebę. Gatunki te łatwo dziczeją oraz szybko rozprzestrzeniają przez wysiew szybko dojrzewających i opadających nasion lub rozrastanie się długich (5-6 m) rozłogów. Powoduje to tworzenie się gęstych skupisk tych roślin, trudnych do likwidacji (Hałuzo i in. 2004).

Miskant olbrzymi (*Miscanthus x giganteus*)

Miskant olbrzymi, to mieszańiec powstały w wyniku skrzyżowania miskanta chińskiego z miskantem cukrowym. Jest on okazałą trawą kępową o bardzo głębokim, silnym systemie korzeniowym sięgającym do 2,5 m w głąb ziemi oraz części nadziemnej dorastającej do wysokości 200-350 cm. Wartość kaloryczna miskanta wynosi 19,25 MJ/kg s.m. Charakteryzuje się on szybkim wzrostem, wysokim plonem biomasy (6-30 t/ha w zależności od warunków uprawy) oraz stosunkowo wysoką odpornością na niskie temperatury roślin starszych. W warunkach naszego kraju nie wytwarza nasion i rozmnażany jest tylko wegetatywnie. Biomase miskanta zbiera się w lutym lub marcu. Rośliny te można uprawiać przez 10-12 lat na jednym polu, przy czym najlepiej plonują one w ciągu pierwszych 8-9 lat trwania plantacji (Stolarski 2004).

Proso różgowate (*Panicum virgatum*)

Proso różgowate jest nieznaną w Polsce jednoliścienną rośliną energetyczną, podczas gdy w USA i w Zachodniej Europie prowadzone są intensywne prace nad jej szerokim zastosowaniem w uprawach energetycznych. Według dotychczasowych informacji nadaje się do uprawy w naszym klimacie. Plon suchej masy w czasie zbioru jest bardzo wysoki i wynosi 16-22 ton/ha, a wartość energetyczna 17-18,4 MJ/kg. Rozmnaża się z nasion, których podczas zakładania plantacji wysiewa się 3-11 kg/ha na głębokość 0,6-1,3 cm. Nasiona kiełkują w około 50%. Proso różgowate rośnie dobrze na glebach o odczynie pH 4,9-7,6. Siewki najlepiej wschodzą w 20oC, rośliny przeżywają natomiast temperaturę -30oC. Trwałość plantacji może wynosić 10 lat. Korzystne dla energetyki jest też to, że rośliny są typu fotosyntetycznego C4.

Kukurydza (*Zea mays*)

Kukurydza jest powszechnie uprawianą rośliną na ziarno na świecie. Plon zielonej masy wynosi 50-60 ton/ha, natomiast plon suchej masy może sięgać 45 ton/ha, w tym plon łądyg stanowi około 30

ton, ziarna 11 ton, osadek 3-5 ton, co przy dużej masie roślinnej i niskiej wilgotności powinno stawiać tę roślinę wśród najbardziej przydatnych w energetyce. Wartość energetyczna jest zbliżona do wartości zbóż (ok. 17-18 MJ/kg suchej masy). Korzystne dla energetyki jest też to, że rośliny są typu fotosyntetycznego C4. Kukurydzę uprawia się z siewu ziarna na glebach żyznych, ciepłych, przewiewnych, których jakość mogłaby być poprawiona zastosowaniem odpowiednich biostymulatorów i nawożeniem uszlachetnionymi osadami z oczyszczalni miejskich (Grzesik, Romanowska-Duda 2008). Kukurydza zaczyna znajdować duże zastosowanie w produkcji bioenergii ze względu na wysoki plon biomasy, sprzyjające warunki klimatyczne obecnie i w przewidywanym ocieplającym się klimacie oraz możliwość uzyskania z niej energii poprzez spalane, zgazowywanie lub produkcję biopaliw.

Doskonałym surowcem energetycznym i opłacalnym z punktu widzenia ekonomicznego, oprócz wspomnianych wyżej roślin, mogą być zboża, które po skoszeniu spala się wraz z ziarnem lub w postaci tylko słomy. Dotyczy to głównie żyta i owsa, które uprawia się na glebach słabszych. Kolejnymi, mającymi duże zastosowanie w produkcji energii odnawialnej są wieloletnie trawy, które wytwarzają wysoki plon biomasy na glebach różnej jakości, korzystnie wpływają na ekosystem, użyźniają glebę i mogą być bezpośrednio spalane lub zgazowywane (Jabłoński 2004, Gostomczyk 2009).

Obecnie większość biomasy jest wykorzystywana do produkcji energii i ciepła, a najczęściej stosowaną technologią jest współspalanie biomasy z konwencjonalnymi paliwami (Bakhareva, Lewandowska 2008). Wobec nie przystosowania dotychczas stosowanych kotłów w energetyce współspalanie biomasy roślinnej z węglem stwarza wiele problemów, co obniża efektywność pozyskiwania energii tą metodą

Metody i urządzenia dla wstępnego przetwarzania biomasy

Istnieje szereg metod służących wstępnemu przetworzeniu biomasy typu lignino-celulozowego w celu jego spalania w energetycznym kotle przemysłowym bądź w kotle małej mocy wykorzystywanym w jednorodzinnym gospodarstwie domowym. Wśród tych podstawowych metod wstępnej obróbki biomasy, można wymienić: suszenie, rozdrabnianie, brykietowanie, peletyzacją, toryfikacją, toryfikacją sprzężoną z peletyzacją.

A) Suszenie biomasy pomaga rozwiązać problemy związane ze składowaniem zbyt wilgotnego materiału takie jak: pleśnienie (może powodować zagrożenie dla zdrowia, alergię), zagrzewanie (zagrożenie zapłonem), rozpad materiałowy (utrata masy suchej i energii), procesy mikrobiologiczne powodujące emisje toksycznych substancji, obniżenie wartości opałowej. Woda znajdująca się w biomacie musi zostać odparowana w palenisku aby mogło dojść do procesu spalania. Proces suszenia w specjalnych suszarniach jest procesem dosyć kosztownym i wymaga wcześniejszego rozdrobnienia biomasy. Dzięki suszeniu znacząco obniża się użyteczna ilość energii jaką można pozyskać z suszonego paliwa. Obniżając zawartość wilgoci w biomacie z 50% do 20% możemy zwiększyć jej wartość opałową nawet do 60%. Bardzo korzystne w miarę możliwości jest suszenie naturalne na świeżym powietrzu, jednakże dużą wadą takiego rozwiązania jest zagrożenie ze względu na zmiany pogodowych. Producenci kotłów na biomasę zastrzegają nie ważność gwarancji w przypadku gdy paliwo jakim są zasilane ich kotły zawiera zbyt dużą ilość wilgoci. Dobrym i ekonomicznym rozwiązaniem jest zastosowanie solarnej suszarni biomasy, w którym ogrzane energią słoneczną powietrze, doprowadzone jest poprzez specjalnie zaprojektowane dno sitowe, pod spód przyzmy zrębków. Powietrzne kolektory słoneczne posiadają specjalną konstrukcję gwarantującą wysoką sprawność. Powietrze zastosowane jako nośnik energii, sprawia że nie są potrzebne dodatkowe wymienniki, co sprawia iż instalacja jest prostsza i łatwiejsza w eksploatacji.

B) Rozdrabnianie biomasy poprzez mielenie lub cięcie jest podstawowym i często stosowanym sposobem obróbki wstępnej. Rozdrabnianie stosuje się zazwyczaj przed transportem biomasy aby zwiększyć jej gęstość nasypową oraz aby obniżyć koszty transportu. Niestety magazynowanie

rozdrobionej biomasy może mieć negatywne skutki ze względu na podwyższoną aktywność mikrobiologiczną materiału, która skutkuje utratą suchej masy, emisjami gazów cieplarnianych (CH_4 , N_2O) i nagrzewaniem się hałdy, co w skrajnych wypadkach może prowadzić do samozapłonu. Dlatego optymalnym wyjściem, jest rozdrobnienie biomasy bezpośrednio przed jej transportem, a następnie zużycie jej jako paliwa w możliwie najkrótszym czasie.



Rębarki i siczarki do rozdrabniania wierzby energetycznej [katalog ofert CLAAS]



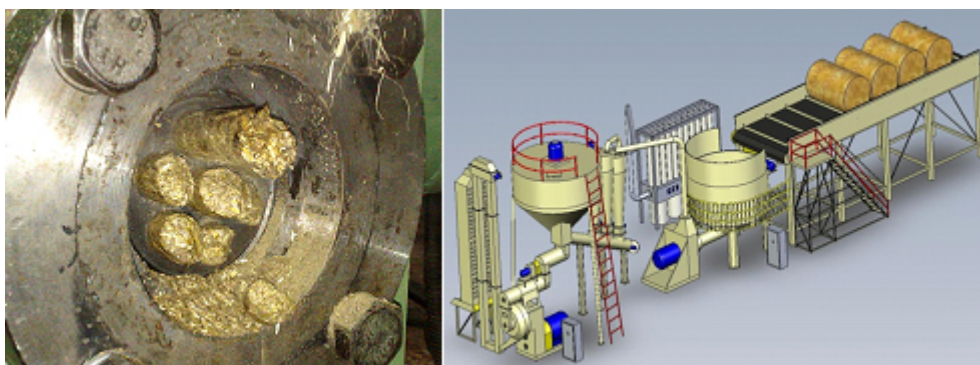
Transport biomasy z pól uprawnych [katalog ofert firmy CLAAS]

C) Peletyzacja biomasy jest procesem zagęszczania paliwa do postaci tzw. biopaliwa w celu zbliżenia jego właściwości do właściwości węgla. Zagęszczeniu ulegają biomasy typu stałego takie jak: trociny, słoma, ziarna, łuski, wióry, zrębki. Ten rodzaj obróbki biomasy zwiększa jej gęstość energetyczną, powoduje ujednoczenie rozmiarów i kształtów, a także obniża zawartość wilgoci co sprawia iż tego typu przetworzone biomasa jest podstawowym biopaliwem dla energetyki zawodowej. Zwiększona gęstość energetyczna biomasy to obniżenie kosztów transportu, lepsze możliwości mieszania z pyłem węglowym w instalacjach z zautomatyzowaną linią podawania paliwa, polepszone właściwości przemiałowe. Peletyzacja biomasy pozwala na zwiększenie stosunku biomasa/węgiel w jej współpalaniu co ma istotny wpływ przy ograniczeniach związanych z wielkością kotła.



Brykietarka do produkcji brykietu z biomasy drzewnej [katalog ofert firmy Brikol]

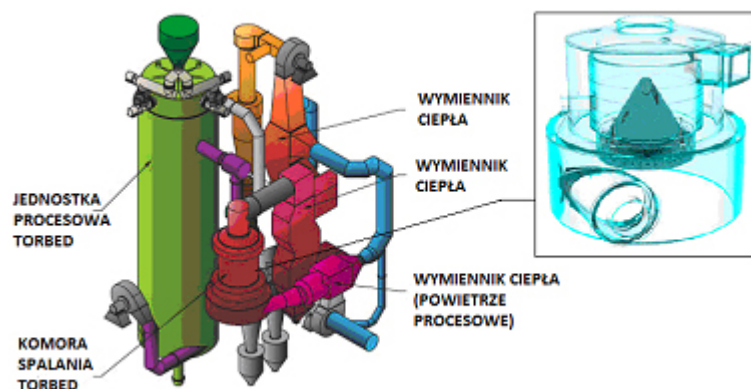
Technologia ta wywodzi się z technik granulowania szeroko stosowanych w przemysłach chemicznych, paszowych i farmaceutycznych, jednak granulowanie biomasy odbywa się pod większym ciśnieniem. Przed procesem wyłaczania biomasa jest oczyszczana, suszona bądź dowlżzana do optymalnej zawartości wilgoci jaką jest 15%, a następnie jest rozdrabniana. Czasem dodawane są specjalne substancje wiążące w postaci tzw. lepiszcza. Rynek związany z biopelletami rozwija się bardzo szybko, a wraz z nim rozwijana jest technologia otrzymania peletów. Jednym z problemów pelet jest wysoka wrażliwość na wodę, gdyż po kontakcie z wodą mogą pęcznieć i rozpadać się. Pelety należy przetrzymywać w trakcie transportu szczelnych workach, a ich składowanie wymaga odpowiedniej infrastruktury (silosów lub zadaszenia), gdyż w innym wypadku pelety ulegną biodegradacji. Proces peletyzacji rozwiązuje wiele problemów wynikających z różnych właściwościami biomasy i węgla ale nie pozwala na całkowite zastąpienie węgla przez biomasę. Pelety wciąż wymagają stosowania młynów młotkowych pomimo poprawionej przemiałowości względem świeżej nieprzetworzonej biomasy w celu ich współspalania w kotłach energetycznych przy stosunku biomasa/węgiel wyższym niż 10%.



Instalacja do paletyzacji o mocy 75kW, 700-1300 kg/h [katalog produktów firmy Brikol]

D) Toryfikacja (karbonizacja biomasy). Toryfikacja biomasy to inaczej proces wysokotemperaturowego suszenia biomasy celem, którego jest przetworzenie biomasy w biopaliwo o właściwościach bardziej zbliżonych do węgla. Dzięki karbonizacji biomasa typu ligninoceluloza staje się bardziej węglopodobną materią. Polepszeniu ulegają właściwości przemiałowe, dzięki którym dochodzi do redukcji wydatków energetycznych na mielenie oraz własności hydrofobowe, które sprawiają, że składowanie biomasy jest bardziej bezpieczne i spada ryzyko degradacji biologicznej. Zmiany te następują w wyniku modyfikacji struktury głównych składników: ligniny i hemicelulozy a także ale w mniejszym stopniu celulozy. Toryfikacja to inaczej proces karbonizacji termo-chemicznej, który jest przeprowadzany w warunkach beztlenowych, w temperaturze około 200 do 300 °C, w warunkach bliskich ciśnieniu atmosferycznemu. Proces toryfikacji nie jest

nowym procesem, jest znany od ponad 80 lat i pochodzi od procesu suszenia i prażenia ziaren kawy. Karbonizacja biomasy rozwinęła się od etapu technologii demonstracyjnej dla celów energetyki zawodowej w latach 90 ubiegłego stulecia. Prins [2009] opisał ten proces bardzo szczegółowo jako proces składający się z dwóch etapów. Pierwszym etapem była reakcja w wyniku, której obserwuje się ubytek masy rzędu 25% masy wzrastającym ze wzrostem temperatury i największym ubytkiem masy w drugim etapie reakcji. Pierwszy szybki etap ubytku masy pierwotnej tłumaczy się dekompozycją hemicelulozy, natomiast drugi wolniejszy i znacznie większy związany jest z dekompozycją celulozy i kolejnym zwęgleniem fragmentów hemicelulozy. Proces termicznego rozpadu biomasy drzewnej jest procesem kompleksowym. W skali mikroskopowej, komórki drewna składają się z tzw. mikrowiązek składających się z cząsteczek celulozy pokrytych cząsteczkami hemicelulozy, a pomiędzy nimi znajduje się lignina. Te różne frakcje drzewne charakteryzują się różnymi właściwościami w tym różną reakcją na ciepło. W związku z tym można wyróżnić trzy strefy na krzywej ubytku masy: hemiceluloza, najbardziej reaktywny składnik, której dekompozycja zachodzi w zakresie temperatur 225-325°C, celuloza, której dekompozycja zachodzi w zakresie temperatur 300-325 °C oraz lignina, której zakres temperaturowy ubytku masy jest największy 250-500 °C. To wyjaśnia dlaczego w procesie karbonizacji (toryfikacji) biomasy, największy ubytek masy jest widoczny w dwóch składnikach biomasy drzewnej, to jest w hemicelulozie i ligninie, a najmniej w celulozie. Łatwo z tego wywnioskować, że skład biomasy ma niesamowicie istotny wpływ na produkty lotne toryfikacji jak i jej stałe pozostałości. Karbonizacja jest procesem endotermicznym podczas, którego masa toryfikatu ulega nawet 30% masy pierwotnej. Ponieważ dochodzi do częściowego wydzielenia się części lotnych musi dojść do ubytku energii, który obok 30% ubytku masy nie przekracza zazwyczaj 10% energii pierwotnie zawartej w biomacie. Najczęściej stosowaną prędkością nagrzewu jest 50 °C/min, natomiast optymalnym czasem przebywania biomasy w reaktorze jest 30 minut. Ze względu na różny czas przebywania próbek z biopaliwem w reaktorze, typu biomasy i zawartości wilgoci, stosunek ubytku masy i energii może się różnić. Najczęściej uzyskuje się 30% zgęszczenie energii dla karbonizacji biomasy przeprowadzonej w wyżej wymienionych warunkach. Proces toryfikacji można podzielić na trzy etapy: suszenie wstępne biomasy, piroliza, zgazowanie. Toryfikację biomasy drzewnej można przeprowadzać w specjalnie do tego przygotowanym reaktorze, piecu opadowym, analizatorze termogravimetrycznym – TGA (z ang. Thermogravimetric Analyzer) i kotle ze złożem fluidalnym. Istnieją dwa sposoby doprowadzania ciepła do tego specjalnie zaprojektowanego reaktora na potrzeby toryfikacji: pierwszy ze sposobów dostarczania ciepła do biomasy zakłada pośrednie, przeponowe dostarczanie ciepła poprzez takie nośniki energii jak olej, woda lub para wodna czy spaliny (reaktory pośrednie). Drugi sposób, w którym ciepło jest przekazywane bezpośrednio do biomasy od gazu reaktorowego (suszarnie fluidalne, zgazowarki) lub spalin (reaktory bezpośrednie). Stosując analizę TGA w celu przeprowadzenia toryfikacji biomasy, która pozwala przeprowadzić proces karbonizacji w dynamicznych warunkach z założoną prędkością nagrzewu, należy brać pod uwagę fakt, że prędkości nagrzewu w warunkach rzeczywistych są znacznie większe w zgazowywarkach i dużych komorach spalania niż te dostępne podczas analizy TGA. Drugim ważnym do wymienienia czynnikiem podczas analizy TGA jest fakt, iż dana prędkość nagrzewu wpływa na limitacje związane z wymianą ciepła i utrudnia analizę kinetyki spalania. Zbyt niska prędkość nagrzewu powoduje, że próbki biomasy drzewnej podgrzewane od temperatur otoczenia do temperatury reakcji toryfikacji w znaczący sposób ulegają dekompozycji (ubytek masy jest zauważalny), natomiast zbyt wysoka prędkość nagrzewu może spowodować problemy związane z limitem wymiany ciepła badanej próbki [Prins, 2009].



Schemat pilotażowej instalacji do toryfikacji wysoko zwilgoconej biomasy, firmy Topell Energy.

Możliwe jest zastosowanie krótszych czasów przebywania próbek biomasy co jednak jest trudniejsze w praktyce. Istnieją najnowsze typy reaktorów na wzór pieca obrotowego lub reaktora ślimakowego z możliwością użycia torgazu jak czynnika gazowego. Części lotne to głównie palne składniki organiczne, niepalne jak dwutlenek węgla czy woda. Zawartość części palnych i niepalnych torgazu związana jest z zawartością wilgoci w biomase oraz od parametrów procesu. Torgaz zawiera w swoim składzie około 50% wody, 10% dwutlenku węgla, co powoduje, że sprawia problemy w wykorzystaniu go jako strumienia ciepła do wstępnego podsuszenia biomasy [Prins, 2009]. W trakcie procesu karbonizacji węgla następuje duży ubytek pierwiastków tlenu i wodoru w porównaniu do ubytku węgla, co sprawia, iż toryfikat jest bardziej węglopodobną materią niż biomasa nieprzetworzona i potocznie nosi nazwę biowęgla. Obniżona wartość stosunku tlen/węgiel sprawia, że proces gazyfikacji biomasy poddanej toryfikacji jest wydajniejszy w porównaniu z gazyfikacją biomasy nie poddanej karbonizacji. Wartość opałowa toryfikatu pochodzenia drzewnego waha się w granicach 18 do 23 MJ/kg. Uważa się, iż toryfikat drzewny pochodzący ze ścinki, drewna odpadowego oraz porozbiórkowego ma zbliżone właściwości fizykochemiczne [Jakubiak, Kortylewski, 2009]. Dużym ograniczeniem karbonizacji jest fakt, iż w wyniku tego procesu nie zwiększa się gęstość energetyczna paliwa, co powoduje, że w praktyce warto zastosować połączenie karbonizacji z peletyzacją. Pelety stworzone z toryfikatu (tzw. torrefied pellets) posiadają wysoką gęstość energetyczną, stają się bardziej odporne na wilgoć i nie wymagają specjalnych miejsc do składowania. Porównując biowęgiel, który uległ jedynie procesowi toryfikacji i który również posiada silną naturę hydrofobową wynikającą ze zniszczenia grup OH, pelety toryfikatu są trwalsze, łatwiejsze do magazynowania i transportu a co za tym idzie łatwiejsze do zastosowania w pyłowych kotłach węglowych lub w kotle ze złożem fluidalnym [Arias i wsp 2008]. Jednak nawet tak wysoce zaawansowane technologie przygotowania biomasy do współspalania z węglem nie likwidują kłopotów związanych z tworzeniem się osadów na ściankach wymienników i ekranów kotła oraz korozją. Na dzień dzisiejszy ze względu na dosyć wysokie koszty proces toryfikacji nie jest jeszcze stosowany na skalę przemysłową [Arias, Pevida 2008; Won Chan Park 2010].



Transport słomy na terenie elektrociepłowni [elektrociepłownia w Tampere w Finlandii]

Urządzenia dla spalania biomasy

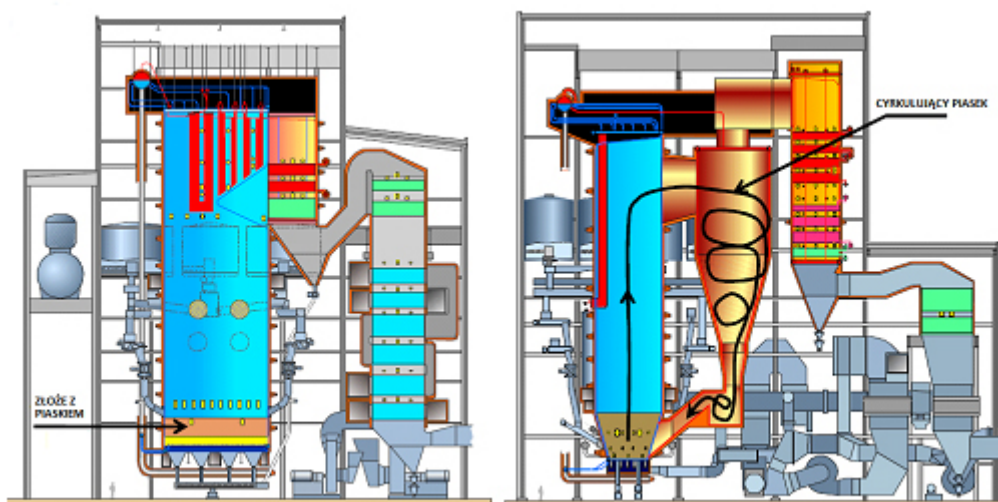
Biomasę typu lignino-celulozowego można spalać na różne sposoby. Ogólnie przyjęty podział to spalanie biomasy bez dodatku innego paliwa- tzw. spalanie bezpośrednie oraz współspalanie biomasy z innym paliwem np. węglem. O ile samodzielne spalanie biomasy jest technologicznie opanowanym procesem o tyle współspalanie biomasy z węglem powoduje wiele kłopotów eksploatacyjnych. Najlepszą formą paliwa do spalania w kotłach jest pelet. Istnieje szereg rozwiązań technicznych kotłów na pelety. Najbardziej popularne posiadają w swojej budowie podajniki ślimakowe, którymi to pelet bądź tzw. ekogroszek podawany jest do komory paleniskowej.



Kocioł do spalania pelet z odpadów drzewnych [katalog produktów CleanTech]

Współspalanie biomasy z węglem kamiennym lub brunatnym w dużych kotłach bloków energetycznych wydaje się na dzień dzisiejszy rozwiązaniem najbardziej racjonalnym w momencie gdy zasoby biomasy znajdują się w bliskim sąsiedztwie (do 80 km od miejsca spalania) elektrowni lub elektrociepłowni. W instalacjach, w których stosuje się współspalanie biomasy z węglem, można zauważyć stabilizację systemu, kompensację okresowych zmian ilości i jakości biomasy. Koszty inwestycyjne oraz operacyjne współspalania w blokach cieplnych są niższe niż w systemach cieplnych, w których dochodzi do spalania samej biomasy. Dodatkowo współspalanie przynosi

wymierne korzyści. Pomimo tego biomasa nadal budzi zastrzeżenia operatorów kotłów energetycznych. Istnieje wiele problemów logistycznych z biomasą (kosztowny transport i magazynowanie) oraz wiele problemów natury technicznej: współmielenie oraz podawanie paliwa do kotła, powstawanie osadów na ścianach ekranów kotła, powierzchniach wymienników ciepła i innych elementach kotła (szlakowanie, osady sypkie, zużłowanie), spiekanie a także korozja. Wysoka zawartość wilgoci w biomasie, jej niejednorodność i bardzo niska gęstość energetyczna (wartość opałowa biomasy wynosi 50% tej samej masy węgla, kiedy jej gęstość energetyczna stanowi 2 do 7% gęstości energetycznej węgla), a także utrudniony przemiał powodują, że udział współspalanej biomasy z reguły nie przekracza 10% udziału w strumieniu paliwa do paleniska. Trudności współspalania biomasy narastają wraz ze wzrostem udziału biomasy (przede wszystkim gdy stosuje się niskiej jakości biomasę w bezpośrednim współspalaniu z węglem) [Cocker-Maciejewska 2007]. Biomasa jest paliwem o słabych właściwościach przemiałowych, może posiadać wysoką zawartość chloru, posiada własności hydrofilowe, jej popioły mają niską temperaturę topnienia, co prowadzi do szlakowania kotła. Istnieje wiele sposobów zapobiegania wyżej wymienionym problemom wśród których można wymienić: wymiana zniszczonego urządzenia, mechaniczne usuwanie osadów, czyszczenie złoża fluidalnego, intensyfikacja procesu poprzez dodawanie związków chemicznych, zmiana bądź dodanie nowego elementu do systemu instalacji cieplnej. Niestety wszystkie te metody likwidują tylko zaistniałe skutki współspalania biomasy.



Schemat kotła z bębnowym złożem fluidalnym do spalania biomasy [katalog produktów firmy Metzo]

Jednymi z najnowocześniejszych urządzeń do spalania biomasy są kotły ze złożem fluidalnym, które dzięki zastosowaniu dodatkowego materiału fluidyzującego charakteryzują się wysoką sprawnością i niezawodnością. Materiał fluidyzujący najczęściej w postaci różnego rodzaju krzemionek o odpowiednim rozdrobieniu tworzy tzw. warstwę fluidyzującą, która pozwala na doskonałe rozprowadzenie ciepła po powierzchniach ogrzewalnych kotła (intensyfikacja wymiany ciepła) oraz znacznie poprawia sprawność spalania nawet najbardziej wilgotnej biomasy. W obecnej chwili wzrasta zapotrzebowanie na energię w , a co za tym idzie poziom zanieczyszczeń emitowanych do atmosfery. Bardzo ważnym aspektem produkcji energii stają się technologie dążące do największej redukcji szkodliwych tlenków siarki (tzw. SO_x) oraz tlenków azotu (NO_x). Biorąc pod uwagę iż Polska energetyka opiera się głównie na produkcji energii z węgla, dzięki zastosowaniu kotłów fluidalnych jesteśmy w stanie „wychwycić” ponad 99% pyłów powstałych w procesie spalania oraz skutecznie zredukować poziom dwutlenku siarki i azotu. Aktualnie do atmosfery wyrzucane jest maksymalnie 5% związków siarki i tlenków azotu zawartych w węglu.

Kotły ze złożem fluidalnym charakteryzują się, optymalnymi warunkami spalania materiału. Stała niska temperatura spalania, oraz brak stref spalania typowych do spalania w płomieniu, znacznie ogranicza emisję tlenków azotu. Dodawanie sorbentu wapiennego do paliwa umożliwi wiązanie siarki bezpośrednio w złożu; poprzez odsiarczanie 50-98%; daje to możliwość spalania paliw o znacznej zawartości siarki.

Literatura

- Arias B., Pevida C., Feroso J., Plaza M.G., Rubiera F., Pis J.J. 2008. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass, *FUEL PROCESSING TECHNOLOGY*, 89 (2008) 169-175.
- Bakhareva A., Lewandowska J. 2008. Biomasa – rozwijający się rynek. *Czysta energia* 26, 10
- Benito M., Masauger A., De Antonio R., Moliner A. 2005. Use of peruning waste compost as component in soils growing media *Bioresource Technology* 96. 597-603.
- Bridgeman T.G., Jones J.M., Shield I., Williams P.T. 2008. Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties, *FUEL*, 87 (2008) 844-856.
- Cocker-Maciejewska A. 2007. Obróbka wstępna biomasy na potrzeby systemów energetycznych, *Ochrona środowiska i zasobów naturalnych* nr 30, 2007, str.133-141.
- Cogaliastro A., Domon G., Daigle S. 2001. Effects of wastewater sludge and woodchip combinations on soil properties and growth of planted hardwood trees and willows on a restored site *Ecological Engineering* 16. 471-485
- Dom Doradztwa Biznesowego 2007. Wierzba – świętokrzyski las energii. Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej, z Europejskiego Funduszu Społecznego oraz z budżetu państwa w ramach Zintegrowanego Programu Operacyjnego Rozwoju Regionalnego.
- Gostomczyk W. 2009. Energetyczne wykorzystanie słomy jako lokalnego paliwa. *Konwersja odnawialnych źródeł energii. Wieś Jutra. Warszawa* 109-121
- Grzesik M., Romanowska-Duda B. 2009a. The effect of potential climatic changes, Cyanobacteria, Biojodis and Asahi SL on development of the Virginia fanpetals (*Sida hermaphrodita*) plants. *Pamiętnik Puławski: Zeszyt* 151. 483-491
- Grzesik M., Romanowska-Duda Z. B. 2009b. Technologia hydrokondycjonowania nasion ślazuwca pensylwańskiego (*Sida hermaphrodita*) w aspekcie zmian klimatycznych. W: *Monografia: Produkcja Biomasy, Wybrane Problemy*. ISBN 83-89503-81-6, wyd. *Wieś Jutra*, red. Alojzy Skrobaccki, rozdz. VII. 63-69.
- Grzesik M., Romanowska-Duda Z. B., Piotrowski K. 2009. The effect of potential change in climatic conditions on the development of the energy willow (*Salix viminalis*) plants. *Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE) and SECOTOX Conference, Mykonos*, Ed: A. Kungolos, K. Aravossis, A. Karagiannidis, P. Samaras, *GRAFIMA" Publ.*, D. Gounari 62-68, Thessaloniki, ISBN 978-960-6865-09-1, vol. IV. 1877-1882.
- Grzesik M., Z. Romanowska-Duda, M.E. Andrzejczak, P. Woźnicki, D. Warzecha 2007. Application of sewage sludge to improve of soil quality by make use of model plant energy *Acta Physiol. Plant.* 65-66.
- Grzesik M., Z.B. Romanowska-Duda. 2006. The use of blue green algae in ecological plant production. *Workshop of Inter. Research Network: Physiological and practical aspects of the yield and seed quality improvement by ecological methods; 21.06.2006, Warsaw.* 16-17.
- Grzesik M., i Z. Romanowska-Duda 2008 *Ekologiczna utylizacja osadów ściekowych w produkcji roślin energetycznych. XIII Konferencja Naukowa Nowe Techniki i Technologie w Rolnictwie Zrównoważonym. 13-14.03.2008 Kielce.* 12
- Grzybek A., Gradziuk P., Kowalczyk K., 2001: *Słoma energetyczne paliwo*, „*Wieś Jutra*” Sp. z o.o. Warszawa.

- Hałuzo M., Musiał R., Brokos B. 2004. Ocena zasobów i potencjalnych możliwości pozyskania surowców dla energetyki odnawialnej w województwie pomorskim. Biuro Planowania Przestrzennego w Słupsku. 1-59
- Jabłoński R. 2002: *Rosa multiflora* jako roślina energetyczna. Konferencja Wdrażanie nowych technologii w zakresie wykorzystania produktów roślinnych jako materiału energetycznego. RCDRRiOW w Barzkowicach.
- Jabłoński R. 2004: Rośliny energetyczne – wyniki badań energetyczności. Seminarium Bioenergia w rolnictwie, Poznań, w: *Czysta Energia*, 10/2004.
- Jakubiak M., W. Kortylewski 2009. *Toryfikacja Biomasy*, Politechnika Wrocławska, Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów, Wrocław 2009.
- Kościk B. 1997. Przyrodniczo-ekonomiczne uwarunkowania uprawy roślin na cele energetyczne w Polsce. Seminarium Możliwości wykorzystania biomasy (ze szczególnym uwzględnieniem słomy i odpadów drzewnych) na cele energetyczne. RCDRRiOW w Starym Polu.
- Majtkowski W. 2003: Potencjał upraw energetycznych. Seminarium Badania właściwości i standaryzacji biopaliw stałych. EC BREC, Warszawa.
- Podbielkowski Z., Sudnik Wójcicka B. 2003. Słownik roślin użytkowych. PWRiL
Polsce”, Praktyczne aspekty wykorzystania odnawialnych źródeł energii, Plan energetyczny województwa podlaskiego. 25
- Prins M. J. 2009. Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction, Technische Universitet Eindhoven, 2009. The Netherlands.
- Romanowska-Duda Z. B., M. Grzesik, 2010. Racjonalne wykorzystanie osadów ściekowych i Cyanobacteria w produkcji biomasy ślazuwca pensylwańskiego na cele energetyczne. 5 Międzynarodowa Konferencja „Energia Odnawialna Wizytówką Nowoczesnej Gospodarki” 5th International Conference on Renewable Energy, Zakopane, Poland, 23 – 24 March 2010. 21.
- Romanowska-Duda Z., J. Mankiewicz, A. Małecka, A. Wolska 2004. Nitrogen-excreting Cyanobacteria (blue-green algae) as nitrogen fertilizer supplier for growth of higher plant. Konferencja COST, X. 2004. Hiszpania.
- Romanowska-Duda Z., M. Grzesik, M.E. Andrzejczak, P. Woźnicki, D. Warzecha 2007. Influence of stabilized sewage sludge on biomass growth of chosen species of energy plants. *Acta Physiol. Plant.* 102.
- Stolarski M. J.: 2004: Produktywność i pozyskiwanie biomasy wierzby energetycznej, Seminarium „Bioenergia w rolnictwie” opublikowany w: *Czysta Energia*, październik 2004
- Szczukowski S., Tworkowski J.: 2006 „Zmiany w produkcji i wykorzystaniu biomasy w
Szczukowski S., Tworkowski J.: 2009. Wybrane aspekty plonowania i wykorzystania biomasy wierzby. *Wiś Jutra.* 15-2
- Szczukowski S., Tworkowski J. Stolarski M. J. 2004: *Wierzba energetyczna*, Plantpress Sp. z o.o. Kraków.
- Won Chan Park, Arvind Atreya, Howard R. Baum 2010. Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis, *Combustion and Flame* 157 (2010) 481-494.