



Produkcja bioetanolu z surowców celulozowych

Katarzyna Leja, Grażyna Lewandowicz, Włodzimierz Grajek

Katedra Biotechnologii i Mikrobiologii Żywności,
Uniwersytet Przyrodniczy, Poznań

Bioethanol production from cellulose raw material

Summary

Lignocellulose is a potential non-food raw material for production of bioethanol. Its use gives the world economy a chance to be independent from petrochemical industry. In the last decade, interest in bioethanol production from waste raw materials increased. However, production processes require more research in order to optimize the production conditions and decrease its cost. In each production stage, there appear various problems, for example, a selection of hydrolysis enzyme and microorganisms leading to fermentation. Probably, in the near future, the productivity of bioethanol from waste materials will improve.

Key words:

bioethanol, lignocellulose, hydrolysis, fermentation.

1. Wprowadzenie

Zapotrzebowanie na energię i paliwa kopalne wciąż wzrasta. Ropa naftowa jest jednak surowcem o ograniczonych zasobach. Powstaje zatem konieczność opracowania alternatywnych rozwiązań. Jednym z nich jest stosowanie energii odnawialnej, na przykład biopaliw produkowanych z surowców rolniczych [1]. Najczęściej stosowanymi biopaliwami, według Unii Europejskiej, są biodiesel i bioalkohol [2]. Aktualnie biodiesel wytwarzany jest głównie z olejów jadalnych: rzepakowego, palmowego, sojowego oraz arachidowego. Tłuszcze odpadowe stosowane są na znacznie mniejszą skalę. Bioetanol jest produkowany głównie z cukru

Adres do korespondencji

Katarzyna Leja,
Katedra Biotechnologii
i Mikrobiologii Żywności,
Uniwersytet Przyrodniczy,
ul. Wojska Polskiego 48,
60-627 Poznań.

biotechnologia

4 (87) 88–101 2009

trzciniowego (Brazylia) oraz kukurydzy (USA). Wykorzystywane są również, na mniejszą skalę, buraki cukrowe oraz inne rośliny zbożowe, takie jak: pszenica, jęczmień, sorgo, owies, ryż [3-6]. W 2006 r. wyprodukowano w USA 18,35 miliardów litrów bioetanolu, a w Brazylii 16,99 [7]. Stosowanie biopaliw może prowadzić do 65% oszczędności w zasobach źródeł energii [8].

Tabela 1

Światowi potentanci w produkcji bioetanolu (w miliardach litrów)

Kraj	Lata		
	2004	2005	2006
USA	13,4	16,12	18,36
Brazylia	15,1	16,01	16,99
Chiny	3,63	3,78	3,86
Indie	1,74	1,7	1,89
Francja	0,83	0,91	0,95
Niemcy	0,26	0,42	0,76
Rosja	0,76	0,23	0,64
Kanada	0,23	0,23	0,57
Afryka Południowa	0,42	0,38	0,38
Tajlandia	0,26	0,3	0,34

Opracowano według [7].

Istnieje wiele ekonomicznych i środowiskowych zalet stosowania biopaliw jako źródeł energii. Jedną z nich jest zmniejszenie emisji dwutlenku węgla, gazu cieplarnianego, którego wzrost zawartości w atmosferze uważany jest za główną przyczynę zmian klimatycznych. Produkcja paliw z surowców odnawialnych powoduje również uniezależnienie gospodarki światowej od dostawców ropy naftowej, która jest surowcem drogim, i od przemysłu petrochemicznego [7-11]. Dzięki zawartości tlenu, bioetanol wykazuje korzystniejszy profil spalania w silnikach iskrowych i w konsekwencji umożliwia zmniejszenie emisji tlenku węgla, tlenku azotu, węglowodorów, tlenków węgla oraz pyłów do atmosfery. Ma on też wyższą liczbę oktanową, szerszy zakres palności, wyższą prędkość spalania oraz wyższą temperaturę parowania niż benzyna (tab. 2). Wadą jest natomiast mniejsza o 24% wartość opałowa [7,12,13]. Na uwagę zasługuje również fakt, że etanol jest dobrze rozpuszczalny w wodzie i biodegradowalny, co decyduje o jego niewielkiej toksyczności dla środowiska i minimalizuje ryzyko katastrof ekologicznych [14].

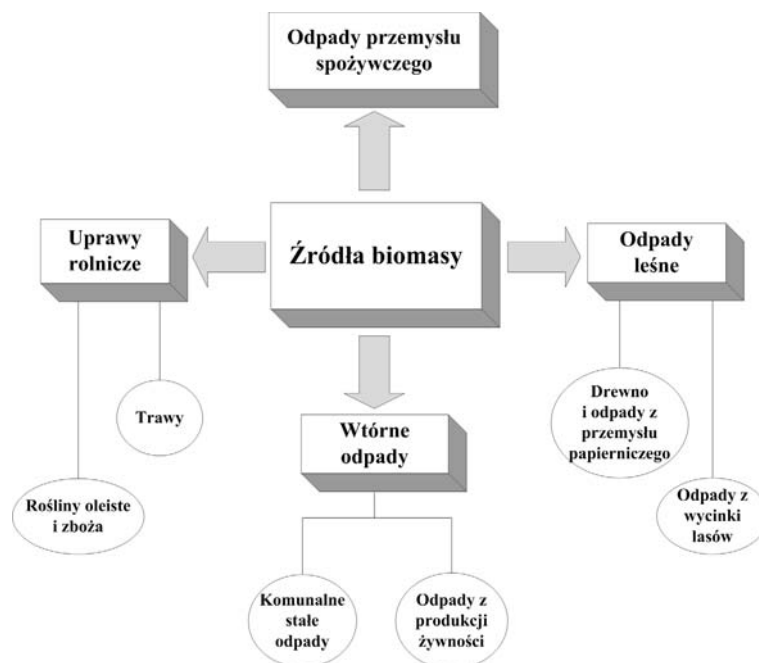
Tabela 2

Niektóre właściwości paliwa alkoholowego

Właściwości paliwa	Izooktan	Metanol	Etanol
liczba oktanowa	100	112	107
temperatura samozapłonu (K)	530	737	606
ciepło utajone parowania (MJ/Kg)	0,26	1,18	0,91

Opracowano według [7].

Produkcja biopaliw z surowców mogących służyć do wytwarzania żywności (tzw. biopaliw I generacji) powoduje jednak szereg niekorzystnych zjawisk ekonomiczno-społecznych. Obserwowany systematyczny wzrost obszaru upraw roślin przeznaczonych na cele energetyczne skutkuje wycinką lasów tropikalnych. Ponieważ są one uważane za najważniejszego „konsumenta” dwutlenku węgla w atmosferze, ich wycinka podważa sensowność produkcji biopaliw. Z jednej strony w krajach masowo stosujących biopaliwa (np. w Europie) następuje obniżenie emisji CO₂, a z drugiej asymilacja tego gazu w strefie tropikalnej znacznie się obniża. W konsekwencji, w skali globalnej, zamiast spodziewanego spadku obserwuje się wzrost zawartości



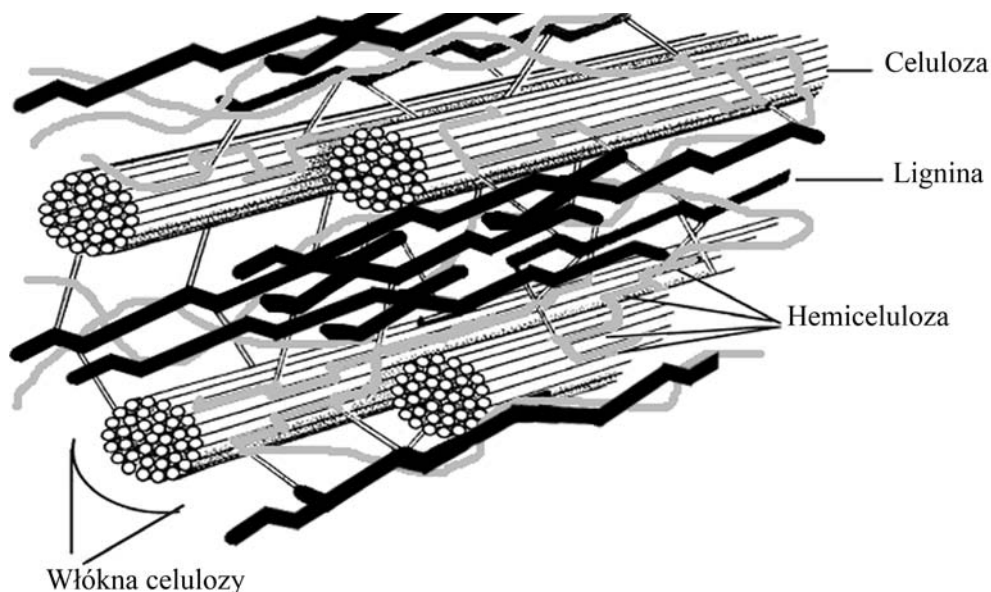
Rys. 1. Źródła biomasy do produkcji biopaliwa II generacji. Opracowano według [16].

tego gazu w atmosferze. Alternatywą może być wykorzystanie do produkcji biopaliwa surowców odpadowych, takich jak: osady ściekowe, kompost, makulatura, drewno odpadowe czy słoma. Pod względem ilościowym najbardziej powszechnymi surowcami do otrzymywania biopaliw II generacji są materiały zawierające tzw. kompleks lignocelulozowy, np. słoma, drewno, roślinne odpadki przemysłu spożywczego, odpadki z produkcji papieru (rys. 1). Zastosowanie takich surowców umożliwia potencjalnie wydajną produkcję bioetanolu, jednak związane jest z koniecznością rozwiązania szeregu problemów natury technicznej [5].

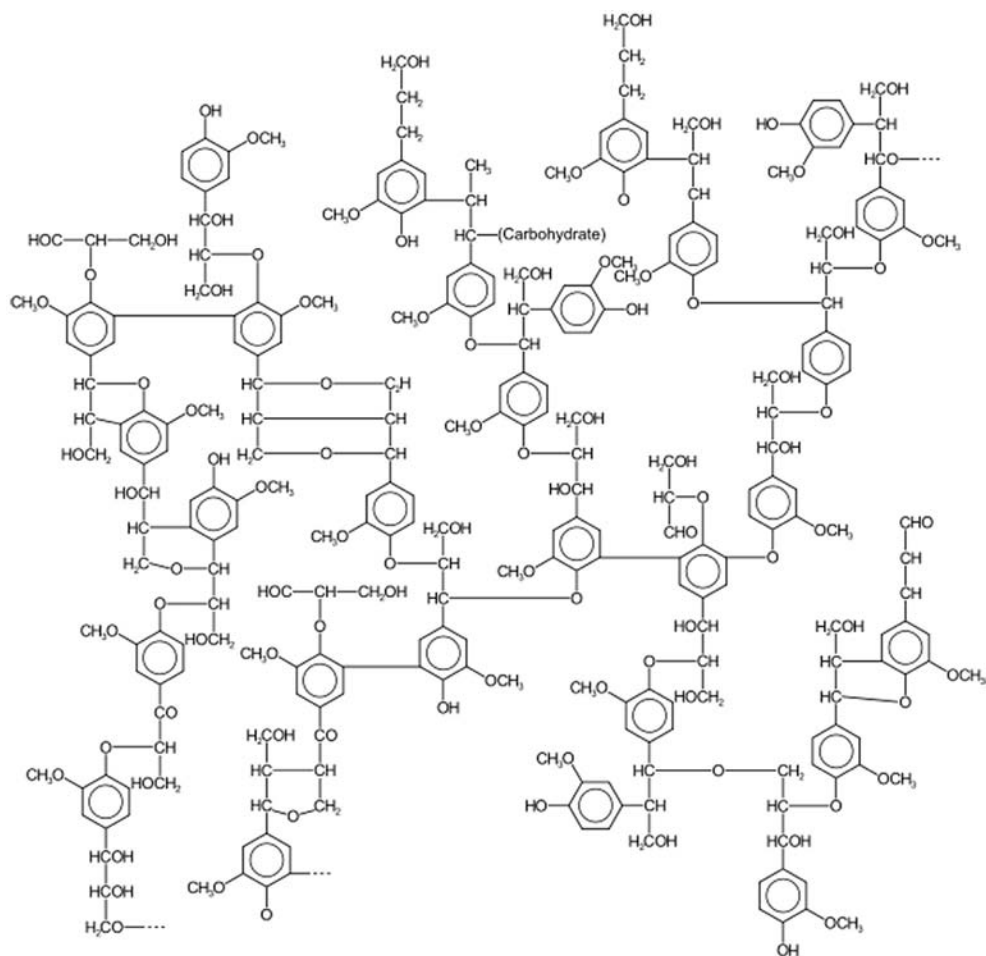
2. Produkcja bioetanolu z kompleksu lignocelulozowego

Kompleks lignocelulozy stanowi skomplikowany układ składający się głównie z trzech frakcji: celulozowej (40-55% suchej masy), hemicelulozowej (24-40% suchej masy) i ligninowej (18-25% suchej masy) (rys. 2) [14,15]. Z wyjątkiem ligniny, substancje te stanowią surowiec do produkcji bioetanolu, ponieważ są to długołańcuchowe polisacharydy hydrolizowane do mieszaniny pentoz i heksoz [16].

Celuloza, najczęściej występujący w przyrodzie polimer, składa się z licznych ugrupowań anhydroglukozy połączonych wiązaniami $\beta(1,4)$ -glikozydowymi. Może być hydrolizowana enzymatycznie lub z zastosowaniem roztworów rozcieńczonych i stężonych kwasów. Enzymami zdolnymi do hydrolizy celulozy są: endoglukonazy (rozrywają wiązania międzycząsteczkowe), egzoglukonazy (usuwiają mono- i dimery

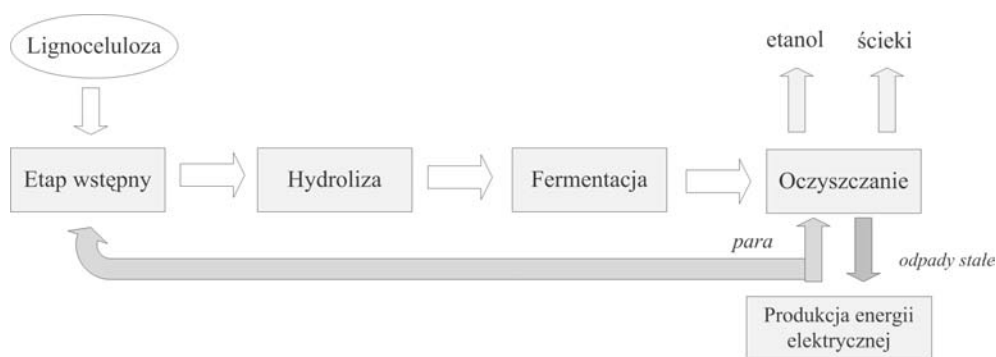


Rys. 2. Struktura kompleksu lignocelulozowego. Opracowano według [17].



Rys. 3. Struktura ligniny. Źródło [20].

z końca łańcucha glukozy) oraz β -glukozydaza (hydrolizuje dimery glukozy). Hydrolyza celulozy jest trudna, ponieważ mikrowłókna celulozy stabilizowane są przez wewnętrzne i zewnętrzne wiązania wodorowe i otoczone przez polisacharydy hemicelulozy (mannany i ksylany) złączone za pomocą wiązań kowalencyjnych i wodorowych. Hemiceluloza jest heteropolimerem składającym się z cukrów – heksoz (D-galaktoza, L-galaktoza, D-mannoza, L-fruktoza) i pentoz (L-ramnoza, arabinoza, ksyloza) oraz kwasów uronowych (kwas D-glukoronowy). Hydroliza hemicelulozy jest łatwiejsza niż celulozy. Lignina to makromolekuła o charakterze fenolowym. Lignina jest produktem kondensacji trzech monomerycznych alkoholi: *trans-p*-kumarylowego, *trans-p*-koniferylowego oraz *trans-p*-sinapylowego. Hydroliza ligniny jest procesem skomplikowanym ze względu na liczne wiązania eterowe i węglowe C-C [18,19] (rys. 3).



Rys. 4. Ogólny schemat procesu technologicznego. Opracowano według [16].

W Europie najwięcej badań dotyczących wykorzystania kompleksu lignocelulozowego do produkcji biopaliwa prowadzonych jest w Szwecji i w Danii, a na świecie w Stanach Zjednoczonych, Kanadzie, Brazylii i Japonii. Lignoceluloza ma liczne zalety, m.in. jest tania, wydajna i łatwo dostępna (roczna produkcja 200×10^9 ton). Pożytkuje się ją m.in. z twardego drewna, roślin zielarskich, odpadków rolniczych, odpadków z produkcji papieru. Produkcja biopaliwa z kompleksu lignocelulozowego jest jednak mocno ograniczona. Czynnikiem limitującym produkcję są wysokie koszty wynikające ze złożonej budowy kompleksu lignocelulozowego, która utrudnia dotarcie enzymów celulolitycznych do wnętrza surowca. Uzyskanie wysokiej wydajności w procesie biokonwersji substratu lignocelulozowego do etanolu, gwarantujące opłacalność całego procesu, wymaga zastosowania dodatkowych zabiegów wstępnej obróbki surowca mającej na celu usunięcie ligniny oraz hydrolizę hemicelulozy [18,19].

Proces obróbki wstępnej powinien być tani i przyjazny środowisku, a ponadto w jego wyniku całość frakcji węglowodanowej powinna stać się podatna na hydrolizę enzymatyczną i fermentację. Celem większości badań dotyczących wykorzystania kompleksu lignocelulozowego do produkcji paliwa drugiej generacji jest opracowanie takiej technologii, która umożliwi kompleksowe zagospodarowanie całości surowca lignocelulozowego, co przyczyni się do zwiększenia efektywności produkcji bioetanolu (fermentacja zarówno frakcji celulozowej jak i hemicelulozowej), a także umożliwi zagospodarowanie ligniny [18].

Produkcja biopaliwa z kompleksu lignocelulozowego obejmuje kilka etapów: etap wstępny (ang. *pretreatment*), hydrolizę, fermentację oraz oczyszczanie produktu (rys. 4) [16].

2.1. Wstępna obróbka kompleksu lignocelulozowego

Wstępna obróbka kompleksu lignocelulozowego to pierwszy etap biokonwersji lignocelulozy do bioetanolu. Podczas tego procesu naruszona zostaje struktura lignocelulozy co ułatwia przebieg hydrolizy i uzyskania fermentujących cukrów z celulozy i hemicelulozy. Następuje zwiększenie dostępności enzymów do frakcji polisacharydowych i zwiększenie szybkości ich działania. Dobrze przeprowadzony etap wstępny zwiększa ilość dostępnych cukrów, nie powoduje ich degradacji i utraty, nie skutkuje wytwarzaniem inhibitorów hydrolizy i fermentacji, a także jest tani. Wydajność hydrolizy celulozy do glukozy, głównego substratu w procesie fermentacji alkoholowej jest limitowana w głównej mierze obecnością ligniny, polimeru który z jednej strony ogranicza swobodny dostęp enzymów celulolitycznych do mikrofibryl celulozowych, a z drugiej pełni rolę adsorbenta wiążącego molekuły enzymu na swojej powierzchni, powodując tym samym ich nieodwracalną inaktywację. Uzyskanie wysokiej wydajności w procesie biokonwersji substratu lignocelulozowego do etanolu, gwarantującej opłacalność całego procesu wymaga zatem zastosowania dodatkowych zabiegów traktowanych w kategoriach wstępnej obróbki surowca mającej na celu usunięcie ligniny oraz hydrolizę hemicelulozy [21,22].

Fizyczne metody wstępnej obróbki obejmują: mielenie, wysokociśnieniowe parowanie surowca połączone z gwałtownym rozprężaniem oraz zastosowanie promieniowania o wysokiej energii. Procesy chemiczne przeprowadza się z wykorzystaniem alkaliów (NH_3 , NH_4SO_3 , NaOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$), kwasów (H_2SO_4 , HCl , H_3PO_4), gazów (ClO_2 , NO_2 , SO_2) lub czynników utleniających (H_2O_2 , O_3). Stosuje się również procesy ekstrakcji w układzie ciecz-ciało stałe z zastosowaniem układów etanol-woda, benzen-etanol, butanol-woda, glikol polietylenowy, jak również rozpuszczalników umożliwiających separację celulozy (etylenodiamina), czy też substancji spęczniających (SnCl_4 , aminy). Proponowano także zastosowanie procesu pirolizy jako etapu obróbki wstępnej kompleksu lignocelulozowego [11,23-25]. Metody biologiczne wykorzystują mikroorganizmy trawiące ligninę (grzyby *Phanerochaete chrysosporium* oraz bakterie *Nocardica* sp.) i celulozę (grzyby brązowej zgnilizny) oraz mikroorganizmy trawiące zarówno celulozę, jak i ligninę (grzyby białej i czerwonej zgnilizny). Największą skuteczność wykazują grzyby białej zgnilizny (*P. chrysosporium*). Wykorzystywane są także owady trawiące ligninę i/lub celulozę (termity) oraz enzymy (lakkaza, peroksydaza manganowa, peroksydaza ligninowa, kompleks celulaz). Zaletą metod biologicznych obróbki wstępnej jest niskie zapotrzebowanie na energię, wadą natomiast bardzo wolny przebieg procesu [7-25].

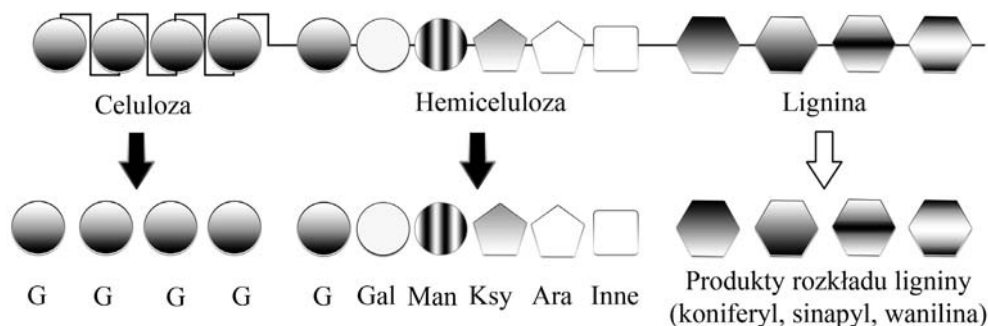
Obecnie, najbardziej efektywnym procesem jest obróbka ciśnieniowa połączona z nagłym rozprężaniem. Gdy stosowana jest para, proces ten określany jest jako tzw. eksplozja pary (ang. *steam explosion*). Można także do tego celu stosować amoniak (AFEX, ang. *Ammonia Fiber Explosion*). Przeprowadza się ekstruzję połączoną z wprowadzeniem pod dużym ciśnieniem amoniaku do komory ekstrudera. Amoniak łączy się z ligniną i po obniżeniu ciśnienia rozrywa ściany komórkowe [26].

Podczas eksplozji pary stosuje się temperaturę 160-260°C (ciśnienie 0,69-4,83 MPa). Proces ten powoduje degradację hemicelulozy i przekształcenie ligniny. Zaletą jest mniejsze zużycie energii niż w przypadku obróbki mechanicznej, wadą natomiast powstawanie inhibitorów mikroorganizmów stosowanych podczas fermentacji. Ponadto, frakcja sacharydowa i ligninowa nie zostają całkowicie oddzielone i dochodzi do częściowej degradacji ksylianów [26,30]. Metoda AFEX polega natomiast na poddaniu materiału lignocelulozowego działaniu płynnego amoniaku w warunkach wysokiej temperatury i ciśnienia. Po określonym czasie ciśnienie zostaje obniżone. Stosuje się 1-2 kg amoniaku na 1 kg suchej biomasy. Wadą tej metody jest mała efektywność w przypadku materiałów zawierających znaczne ilości ligniny (18-30%), zaletą natomiast brak wytwarzania inhibitorów dalszych procesów produkcji bioetanolu [26].

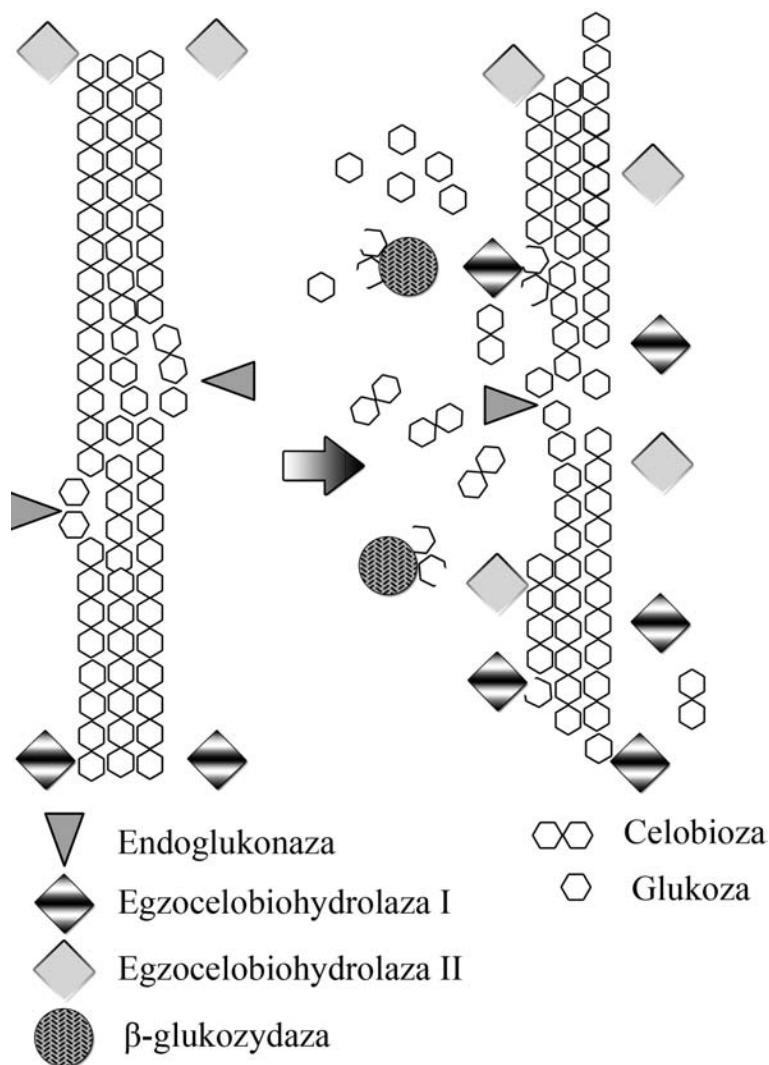
2.2. Hydroliza

Po zakończonym etapie wstępnej obróbki, surowiec zostaje poddany hydrolizie enzymatycznej [23,29]. Proces ten prowadzony jest w celu otrzymania pentoz i heksoz z kompleksu lignocelulozowego. Cukry te poddawane są fermentacji w kolejnym etapie produkcji (rys. 5) [19].

Hydroliza celulozy do cukrów podlegających fermentacji alkoholowej, ze względu na złożoną budowę kompleksu lignocelulozowego, jest najtrudniejszym etapem produkcji etanolu z surowców lignocelulozowych [30]. Koszty tego etapu stanowią 25-30% całkowitych kosztów procesu [31]. Reakcja hydrolizy katalizowana jest przez rozcieńczone oraz sężone kwasy, ługi oraz enzymy (celulazy). Hydroliza enzymatycz-



Rys. 5. Hydroliza lignocelulozy do fermentowalnych cukrów. Strzałki reprezentują hydrolizę (tylko monomery powstałe w wyniku hydrolizy, reprezentowane przez czarne strzałki, są fermentowalne), G – Glukoza, Gal – Galaktoza, Man – Mantoza, Ksy – Ksyloza, Ara – Arabinoza, inne – L-ramnoza, L-fukoza, kwasy urynowe. Opracowano według [19].



Rys. 6. Hydroliza celulozy za pomocą enzymów celulolitycznych. Opracowano według [37].

na posiada wiele zalet, m.in. jest tania i nie powoduje korozji. Niskie koszty tej metody wynikają z warunków prowadzenia procesu (pH 4,8; temperatura 45-50°C). Produktem hydrolizy są cukry redukujące zawierające glukozę. Celulazy zdolne do hydrolizy materiału lignocelulozowego produkowane są przez bakterie i grzyby. Wytwarzają je mikroorganizmy tlenowe, beztlenowe, mezofilne i termofilne. Bakterie wytwarzające celulazy to: *Clostridium*, *Cellulomonas*, *Bacillus*, *Thermomonospora*, *Ruminococcus*, *Bacteriodes*, *Erwinia*, *Acetovibrio*, *Microbispora* i *Streptomyces*. Grzyby produkujące celulazy to: *Sclerotium rolfsii*, *P. chrysosporium* oraz gatunki: *Trichoderma*,

Aspergillus, *Schizophyllum* i *Penicillium*. Kompletny rozkład natywnej celulozy wymaga współdziałania trzech grup celulaz: endoglukonaz (EC 3.2.1.4.), egzoglukonaz (EC 3.2.1.91.) oraz β -glukozydaz (rys. 6) [7,26,32]. Wydajność hydrolizy można zwiększyć dodając do reakcji większe ilości enzymu. Zwiększa to jednak znacznie koszty procesu [33].

2.3. Fermentacja

W przypadku produkcji bioetanolu z kompleksu lignocelulozowego substratem do fermentacji są zarówno heksozy (glukoza, fruktoza, sacharoza) (1), jak i pentozy (ksyloza, mannoza, galaktoza, arabinoza) (2) [16]:



Problemem jest dobór takich mikroorganizmów, które są zdolne do fermentacji związków obu typów. W produkcji wykorzystującej surowiec roślinny najczęściej stosowane są drożdże *Saccharomyces cerevisiae* oraz bakterie etanolowe *Zymomonas mobilis*. Nie są one jednak zdolne do fermentacji pentozy, co ogranicza ich stosowanie w przypadku produkcji etanolu z surowców lignocelulozowych. Zdolność do fermentacji pentozy wykazują dwie grupy mikroorganizmów – bakterie jelitowe oraz niektóre drożdże. Wydajność procesu jest jednak niewielka. Ponadto, w przypadku drożdży fermentujących pentozy (*Pachysolen tannophilus*, *Candida shehatae* i *Pichia stipitis*) utylizacja na dużą skalę jest hamowana w wyniku ich wrażliwości na wysokie stężenie etanolu (>40 g/l), a także brak zdolności fermentacji ksylozy w niskim pH. Metabolizm ksylozy przebiega odmiennie w przypadku bakterii i drożdży. Gdy stosowane są bakterie, izomeraza ksylozy (XI) przekształca ksylozę do ksylulozy, a następnie prowadzona jest fosforylacja. Gdy stosowane są drożdże, ksyloza przekształcana jest w ksylitol, a następnie w ksylulozę w reakcji katalizowanej przez reduktazę ksylozy (XR) i dehydrogenazę ksylitolu (XDH). Jako kofaktory tej reakcji służą NAD(P)H i NAD⁺ [16,19].

Z powodu braku naturalnych mikroorganizmów dla efektywnej, jednoczesnej, fermentacji pentozy i heksoz, wzrasta zainteresowanie stosowaniem technik inżynierii metabolicznej w celu konstrukcji organizmów o pożądanym cechach. Inżynieria metaboliczna polega na polepszaniu aktywności komórek w wyniku zmiany funkcji enzymatycznych, transportowych i regulacyjnych za pomocą techniki rekombinacji DNA [19,34,35]. Inżynieria metaboliczna obejmuje analizę szlaków metabolicznych, projektowanie zmian genetycznych oraz tworzenie zrekombinowanych komórek o zmienionych właściwościach [36]. Mikroorganizmami najczęściej modyfikowanymi do fermentacji glukozy, ksylozy i arabinozy są gatunki z rodzaju *Saccharomyces* i *Pichia*. Idealny mikroorganizm powinien fermentować wszystkie cukry biomasy, wykazywać wysoką

odporność na monomery ligniny, octan i inne inhibitory, a także wytwarzać mieszanę synergistycznie działających celulaz niezbędnych do pełnej hydrolizy celulozy. W literaturze pojawiają się doniesienia o wklonowaniu dwóch genów endoglukonazy z *Erwinia* do produkującego etanol rodzaju *Klebsiella*. Otrzymany w ten sposób mikroorganizm produkował o 22% więcej etanolu, jeżeli krystaliczna celuloza była fermentowana z dodatkiem celulaz grzybowych. Innym przykładem modyfikacji jest bakteria *Lactobacillus*, do której wprowadzono geny odpowiedzialne za rozkład ksylozy, a pozbawiono ją zdolności produkcji kwasu mlekowego z cukrów [38,39]. Wydajną fermentację umożliwia także bakteria *Escherichia coli* K011. Fermentuje ona glukozę, ksylozę oraz arabinozę. Szczep ten wykazuje dużą tolerancję na inhibitory hydrolizy. Wadą *E. coli* K011 jest niestabilność plazmidu podczas inkubacji w 30°C. Podjęto zatem próby ominięcia tego problemu poprzez techniki inżynierii genetycznej. Nowy szczep przygotowany został poprzez transformację bakterii *E. coli* FMJ39 z LOI297. Plazmid LOI297 zawiera operon PET, który posiada geny dehydrogenazy aldehydu (*adh*) oraz dehydrogenazy pirogronianowej bakterii *Zymomonas mobilis* pod kontrolą promotora *lac E. coli*. Wyizolowano mutanty zdolne do hydrolizy ksylozy [40-42]. Sposobem zwiększenia wydajności fermentacji jest także zastosowanie immobilizowanych rekombinowanych komórek drożdży do łatwego zwiększania skali w bioreaktorze. Jeżeli jednak technologia ta ma być stosowana do produkcji etanolu, nośnik musi być możliwie jak najtańszy, nietoksyczny i biodegradowalny, a immobilizacja nie może generować dodatkowych kosztów. Obecnie za najlepszy nośnik do tego celu uważane są gąbki roślinne. Stosowanie zaimmobilizowanych rekombinantów drożdżowych może być jednak stosowane tylko w przypadku surowców skrobiowych [43].

2.4. Wydzielanie etanolu

W przypadku gdy produkty fermentacji są bardziej lotne od wody, najczęściej wybieraną metodą do ich odzyskiwania jest destylacja [44]. Zawartość wody w mieszaninie pofermentacyjnej jest bardzo wysoka, gdyż wynosi powyżej 80%. Zatężenie etanolu do 96% wymaga zatem bardzo dużego nakładu energii, a to z kolei generuje duże koszty [45].

Pierwszym etapem jest tzw. odpęd alkoholu. Produkt (37% bioetanol) jest następnie zatężany w kolumnie rektyfikacyjnej do stężenia równego około 95% [46]. Mieszanina ta transportowana jest do instalacji membranowej, gdzie ulega końcowemu odwodnieniu, zwykle do stężenia powyżej 99,8% etanolu. Metodą odwadniania azeotropu stosowaną na skalę techniczną jest perwaporacja. Proces ten zachodzi w wyniku różnicy stężeń (aktywności) etanolu po obu stronach niesymetrycznej membrany, a mechanizm rozdziału polega na wykorzystaniu różnic w powinowactwie do membrany (zdolności rozpuszczania i dyfuzji) etanolu i wody [19].

Metodą umożliwiającą zmniejszenie nakładów energetycznych procesu pozyskiwania etanolu na etapie odpędu jest destylacja membranowa. Podczas destylacji,

membrana oddziela fermentujący roztwór od destylatu. Stosowane są membrany płaskie lub kapilarne, porowate z porami wypełnionymi gazem (porowatość w zakresie 70-85%); hydrofobowe (niezwilżane przez ciecz), o wysokiej odporności termicznej. Proces jest możliwy do przeprowadzenia, gdy występuje różnica ciśnień cząsteczkowych składników w fazie gazowej. Główną zaletą zastosowania destylacji membranowej jest możliwość prowadzenia procesu w niższej temperaturze. Powoduje to wyeliminowanie kosztów ogrzewania wody do temperatury wrzenia etanolu, a tym samym umożliwia obniżenie całkowitych kosztów produkcji bioetanolu. Inne zalety destylacji membranowej to: możliwość prawie 100% zatrzymania związków nielotnych, niższe niż w konwencjonalnej destylacji ciśnienie procesu, możliwość uzyskania nasyconych roztworów oraz wykonania instalacji z tworzyw sztucznych (ograniczenie korozji) [47,21,22]. Ponadto, destylacja membranowa umożliwia prowadzenie procesu fermentacji ciągłej z odpędem etanolu [21].

3. Podsumowanie

Pozyskiwanie odnawialnych, cennych i bezpiecznych źródeł energii jest głównym problemem, z którym zmagają się dzisiejszy przemysł paliwowy. Taka sytuacja zmusza do poszukiwania nowych rozwiązań. Biopaliwa uzyskiwane z szeroko i łatwo dostępnej biomasy stanowią odpowiednie zamienniki dla paliw tradycyjnych. Polskie uwarunkowania sprawiają, że wykorzystanie biomasy ma olbrzymi potencjał rozwoju. Polska, jako kraj rolniczy, posiada wiele obszarów, które mogą zostać zagospodarowane na uprawy energetyczne.

Liczne doniesienia literaturowe szczególnie dużo uwagi poświęcają produkcji bioetanolu z niespożywczych surowców odpadowych. Produkcja biopaliwa z biomasy prowadzi do obniżenia zarówno konsumpcji oleju napędowego, jak również zanieczyszczenia środowiska. Najczęściej stosowanymi surowcami do otrzymywania biopaliw drugiej generacji są materiały, które zawierają tzw. kompleks lignocelulozowy. Stosowanie takich surowców umożliwia wydajną produkcję bioetanolu, jednak dla powstania efektywnej, opłacalnej technologii produkcji czystego bioetanolu z surowców lignocelulozowych niezbędne są prace optymalizacyjne nad każdym z etapów produkcji, tj. nad efektywną metodą obróbki wstępnej, doбором optymalnych koktajli enzymatycznych do hydrolizy celulozy oraz właściwych mikroorganizmów do fermentacji zarówno heksoz jak i pentoz, a także dostosowaniem optymalnej metody odzyskiwania etanolu po procesie produkcji. Dla opłacalności produkcji ważne jest także opracowanie technologii umożliwiającej wykorzystanie wszystkich substancji wchodzących w skład hemicelulozy – zarówno celulozy i hemicelulozy, ale także ligniny.

Literatura:

1. Szeptycki A., (2007), *Inżynieria Rolnicza*, 7, 97.
2. Ryan L., Convery F., Ferreira S., (2006), *Energy Policy*, 34, 3184-3194.
3. Linde M., Galbe M., Zacchi G., (2008), *Bioresource Technology*, 99, 6505-6511.
4. Mamma D., Christakopoulos P., Koullas D., Kekos D., Macris B. J., Koukios E., (1995), *Biomass and Bioenergy*, 8, 99-103.
5. Siqueira P. F., Karp S. G., Carvalho J. C., Sturm W., Rodríguez-León J. A., Tholozan J., Singhania R. R., Pandey A., Soccol C. R., (2008), *Bioresource Technology*, 99, 8156-8163.
6. Rosenberger A., Kaul H.-P., Senn T., Aufhammer W., (2002), *Industrial Crops and Products*, 15, 91-102.
7. Balat M., Balat H., Oz C., (2008), *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, 551-573.
8. James C., (2007), *Kosmos. Problemy Nauk Biologicznych*, 56, 247-253.
9. Kim S, Dale B. E., (2004), *Biomass Bioenergy*, 26, 361-375.
10. Bohlmann G. M., (2006), *Industrial Biotechnology*, 2, 14-20.
11. Karimi K, Emtiazi G., Taherzadeh M. J., (2006), *Enzyme and Microbial Technology*, 40, 138-144.
12. Hansen A. C., Zhang Q., Lyne P. W. L., (2005), *Bioresource Technology*, 96, 277-285.
13. Balat M., (2007), *Energy Explore Exploit*, 25, 195-218.
14. Sun Y., Cheng J., (2002), *Bioresource Technology*, 83, 1-11.
15. Malherbe S., Cloete T. E., (2002), *Re/Views in Environmental Science & Bio/Technology*, 1, 105-114.
16. Tan K. T., Lee K. T., Mohamed A. R., (2008), *Energy Policy*, 36, 3360-3365.
17. Murphy J. D., McCarthy K., (2005), *Applied Energy*, 82, 148-166.
18. Kristensen J. B., Borjesson J., Bruun M. H., Tjerneld F., Jørgensen H., (2007), *Enzyme and Microbial Technology*, 40, 888-895.
19. Zaldivar J., Nielsen J., Olsson L., (2001), *Applying Microbiological Biotechnology*, 56, 17-34.
20. Glazer A. W., Nikaido H., (1995), *Microbial Biotechnology: Fundamental of Applied Microbiology*, Ed., W. H. Freeman, New York, 340-342.
21. Gryta M., Morawski A.W., Tomaszewska M., (2000), *Catalysis Today*, 56, 159-165.
22. Gryta M., (2005), *Journal of Membrane Science*, 265, 153-159.
23. Laser M., Schuman D., Alen S. G., Lichwa J., Antral M. J., Lynd L. R., (2002), *Bioresource Technology*, 81, 33-44.
24. Söderström J., Pilcher L., Galbe M., Zacchi G., (2003), *Biomass and Bioenergy*, 24, 475-486.
25. Mosier N., Wyman Ch., Dale B., Elander R., Lee Y., Holtzaple M., Ladisch M., (2005), *Bioresource Technology*, 96, 673-686.
26. Smulikowska S., (2006), *Wiadomości Zootechniczne*, 3, 22-28.
27. Sun Y., Cheng J., (2002), *Bioresource Technology*, 83, 1-11.
28. Cara C., Ruiz E., Ballesteros I., Negro M. J., Castro E., (2006), *Process Biochemistry*, 41, 423-429.
29. McMillan J. D., (1997), *Renewable Energy*, 10, 295-302.
30. Canettieri E. V., Moraes Rocha G. J., Carvalho J. A., Almeida e Silva J. B., (2007), *Bioresource Technology*, 98, 422-428.
31. Jacobsen S. E., Wyman Ch. E., (2000), *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 84-86, 81-96.
32. Szijártó N., Szengyel Z., Lidén G., Réczey K., (2004), *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 84-86, 237-245.
33. So K. S., Brown R. C., (1999), *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 77-79, 633, 640.
34. Bailey J. E., (1991), *Science*, 252, 1668-1674.
35. Szewczyk K. W., (2005), *Biotechnologia*, 2 (69), 7-31.
36. Nielsen J., (2001), *Applying Microbiological Biotechnology*, 55, 263-283.
37. Malherbe S., Cloete T. E., (2002), *Re/Views in Environmental Science & Bio/Technology*, 1, 105-114.
38. Mielenz J. R., (2001), *Current Opinion in Microbiology*, 4, 324-329.
39. Zhou S., Davis F. C., Ingram L. O., (2001), *Applying Environmental Microbiology*, 67, 6-14.
40. Sivers M., von Zacchi G., Olsson L., Hahn-Hagerdal, B., (1994), *Biotechnology Progress*, 10, 555-560.
41. Alterthum F., Ingram L. O., (1989), *Applied and Environmental Microbiology*, 55, 1943-1948.

42. Bruce Dien S., Hespell R. B., H Wyckoff H. A., Bothast R. J., (1998), *Enzyme and Microbial Technology*, 23, 366-371.
43. Chen J.-P., Wu K.-W., Fukuda H., (2008), *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 145, 59-67.
44. Madson P. W., Lococo D. B., (2000), *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 84-86, 1049-1061.
45. Karuppiyah R., Peschel A., Martin M., Grossmann I. E., Martinson W., Zullo L., (2007), *Special Symposium-EPIC-1: European Process Intensification Conference-1*, Copenhagen, September 19-20.
46. Hamelinck C. N., van Hooijdonk G., Faaij A. P. C., (2005), *Biomass Bioenergy*, 28, 384-410.
47. Criscuolia A., Carnevale M. C., Driolia E., (2006), *Desalination*, 200, 586-587.