

## Spis treści

Wykaz ważniejszych skrótów i symboli XIII

### **1 . Wprowadzenie....1**

- 1.1. Definicja i rodzaje biopaliw 1
- 1.2. Definicja biomasy 3
- 1.3. Metody konwersji biomasy w biopaliwa 3
- 1.4. Biopaliwa 1. i 2. generacji 4
- 1.5. Zastosowanie i standardy jakości biopaliw 6
- 1.6. Rozwój rynku biopaliw w aspekcie zrównoważonego rozwoju 7
  - 1.6.1. Aspekty środowiskowe produkcji biopaliw 8 •
  - 1.6.2. Aspekty ekonomiczne produkcji biopaliw 13 •
  - 1.6.3. Aspekty społeczne produkcji biopaliw 17 •
  - 1.6.4. Perspektywy rozwoju rynku biopaliw 17

Literatura.....

### **2. Charakterystyka i właściwości biomasy21**

Wprowadzenie.....21

- 2.1. Rodzaje biomasy do produkcji biopaliw 22
  - 2.1.1. Biomasa drzewna 23
- 2.2. Charakterystyka chemiczna biomasy 28
- 2.3. Właściwości fizyczne biomasy 30
- 2.4. Kaloryczność biomasy
- 2.5. Wskaźniki produkcji biomasy 32

Literatura..... ^

### **3. Technologie biodiesla ^**

Wprowadzenie..... ^

- 3.1..... Surowce do produkcji biodiesla /.
  - 3.1.1. Oleje do produkcji biopaliw 1. generacji 37 •
  - 3.1.2. Oleje do produkcji biopaliw 2. generacji 38 •
  - 3.1.3. Oleje i tłuszcze odpadowe 39
- 3.2.. Produkcja oleju 40
  - 3.2.1. Wstępne przygotowanie ziarna 40 •
  - 3.2.2. Tłoczenie oleju 41 •
  - 3.2.3. Ekstrakcja oleju 42 •
  - 3.2.4. Oczyszczanie oleju surowego 42
- 3.3. Oleje jako biopaliwo i metody jego przetwarzania 44
  - 3.3.1. Charakterystyka chemiczna olejów i tłuszczów do produkcji biodiesla 46 •
  - 3.3.2. Wpływ składu chemicznego olejów i tłuszczów na właściwości biodiesla 48
- 3.4. Wytwarzanie biodiesla - procesy i operacje jednostkowe 49
  - 3.4.1. Wytwarzanie estrów metylowych 50 •
  - 3.4.2. Separacja estrów metylowych i gliceryny 58 •
  - 3.4.3. Oczyszczanie estrów metylowych 59 •
  - 3.4.4. Gospodarka metanolem 61 •
  - 3.4.5. Oczyszczanie fazy glicerynowej 63
- 3.5. Instalacje technologiczne do produkcji biodiesla 65
  - 3.5.1. Systemy okresowe 66 •
  - 3.5.2. Systemy z przepływem ciągłym bezciśnieniowe 67 •
  - 3.5.3. Systemy dwustopniowe z wykorzystaniem tłuszczów odpadowych jako surowców 68 •
  - 3.5.4. Systemy ciśnieniowe 69 •

|           |                                                                                               |            |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.5.5.    | Sposoby wykorzystania i zagospodarowania gliceryny                                            |            |
| 71        |                                                                                               |            |
| 3.6.      | Wskaźniki jakości biodiesla                                                                   | 73         |
|           | Literatura.....                                                                               | 78         |
| <b>4.</b> | <b>Technologie bioetanolu</b>                                                                 | <b>82</b>  |
|           | Wprowadzenie.....                                                                             | 82         |
| 4.1.      | Wykorzystanie bioetanolu jako paliwa                                                          | 83         |
| 4.2.      | Surowce do wytwarzania bioetanolu                                                             | 84         |
| 4.3.      | Procesy i operacje jednostkowe                                                                | 86         |
| 4.3.1.    | Wstępne przygotowanie surowców                                                                | 86 •       |
| 4.3.2.    | Hydroliza                                                                                     | 87 •       |
| 4.3.3.    | Fermentacja alkoholowa                                                                        | 88 •       |
| 4.3.4.    | Destylacja i rektyfikacja                                                                     | 89 •       |
| 4.3.5.    | Odwadnianie/osuszanie bioetanolu                                                              | 91 •       |
| 4.3.6.    | Produkty uboczne                                                                              | 96         |
| 4.4.      | Wytwarzanie bioetanolu z surowców zawierających sacharozę - technologie 1. generacji          | 97         |
| 4.4.1.    | Surowce zawierające sacharozę                                                                 | 97 •       |
| 4.4.2.    | Technologie produkcji bioetanolu z surowców zawierających sacharozę                           | 98 •       |
| 4.4.3.    | Zagospodarowanie produktów ubocznych                                                          | 102        |
| 4.5.      | Wytwarzanie bioetanolu z surowców zawierających skrobię - technologie 1. generacji            | 103        |
| 4.5.1.    | Hydroliza i fermentacja alkoholowa surowców zawierających skrobię                             | 103        |
| • 4.5.2.  | Metoda sucha produkcji bioetanolu                                                             | 106 •      |
| 4.5.3.    | Metoda mokra produkcji bioetanolu z kukurydzy                                                 | 108        |
| 4.6.      | Wytwarzanie bioetanolu z biomasy lignocelulozowej - technologie 2. generacji                  | 109        |
| 4.6.1.    | Wstępna obróbka biomasy lignocelulozowej                                                      | 112 •      |
| 4.6.2.    | Detoksykacja                                                                                  | 116        |
| • 4.6.3.  | Fermentacja etanolowa hydrolizatów lignocelulozowych                                          | 117 •      |
| 4.6.4.    | Produkty uboczne fermentacji                                                                  | 118        |
| 4.7.      | Konwersja surowców lignocelulozowych do bioetanolu z wykorzystaniem procesów termochemicznych | 119        |
| 4.7.1.    | Technologia Coskata                                                                           | 119 •      |
| 4.7.2.    | Technologia ZeaChem                                                                           | 121        |
| 4.8.      | Koncepcja lignorafinerii                                                                      | 121        |
|           | Literatura.....                                                                               | 123        |
| VIII      |                                                                                               |            |
| <b>5.</b> | <b>Technologie biogazu</b>                                                                    | <b>125</b> |
|           | Wprowadzenie.....                                                                             | 125        |
| 5.1.      | Wytwarzanie biogazu metodą fermentacji metanowej                                              | 126        |
| 5.1.1.    | Podstawy biochemiczne procesu                                                                 | 126 •      |
| 5.1.2.    | Charakterystyka substratów pod kątem produkcji biogazu                                        | 128 •      |
| 5.1.3.    | Czynniki środowiskowe wpływające na wytwarzanie biogazu                                       | 130 •      |
| 5.1.4.    | Kofermentacja                                                                                 | 131        |
| 5.2.      | Przetwarzanie odpadów komunalnych na biogaz                                                   | 132        |

|           |                                                                                             |            |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.2.1.    | Charakterystyka odpadów komunalnych                                                         | 134 •      |
| 5.2.2.    | Potencjał biogazowy odpadów komunalnych i ich frakcji                                       | 135        |
| 5.3.      | Systemy przetwarzania odpadów komunalnych na biogaz                                         | 136        |
| 5.3.1.    | Systemy mokre                                                                               | 137 •      |
| 5.3.2.    | Systemy suche                                                                               | 143 •      |
| 5.3.3.    | Systemy perkolacyjne                                                                        | 146        |
| 5.4.      | Wytwarzanie biogazu rolniczego                                                              | 148        |
| 5.4.1.    | Substraty i kosubstraty do wytwarzania biogazu rolniczego                                   | 149 •      |
| 5.4.2.    | Przygotowanie biomasy roślinnej do fermentacji                                              | 160 •      |
| 5.4.3.    | Fermentacja biomasy w systemach suchych i mokrych                                           | 164 •      |
| 5.4.4.    | Parametry technologiczne procesu                                                            | 166        |
| 5.5.      | Systemy wytwarzania biogazu rolniczego                                                      | 169        |
| 5.6.      | Oczyszczanie i wzbogacanie biogazu                                                          | 170        |
| 5.6.1.    | Oczyszczanie biogazu                                                                        | 172 •      |
| 5.6.2.    | Wzbogacanie (uszlachetnianie) biogazu                                                       | 172 •      |
| 5.6.3.    | Porównanie metod wzbogacania biogazu z przeznaczeniem na biopaliwo                          | 178        |
|           | Literatura.....                                                                             | 179        |
| <b>6.</b> | <b>Zgazowanie biomasy</b>                                                                   | <b>183</b> |
|           | Wprowadzenie.....                                                                           | 183        |
| 6.1.      | Charakterystyka i przygotowanie surowców do zgazowania                                      | 184        |
| 6.2.      | Spalanie biomasy                                                                            | 186        |
| 6.3.      | Zgazowanie biomasy                                                                          | 187        |
| 6.3.1.    | Mechanizm zgazowania                                                                        | 188 •      |
| 6.3.2.    | Warunki operacyjne zgazowania                                                               | 190        |
| 6.3.3.    | Generatory gazu                                                                             | 190        |
| 6.4.      | Systemy oczyszczania gazu surowego                                                          | 200        |
| 6.4.1.    | Usuwanie smoły                                                                              | 202 •      |
| 6.4.2.    | Usuwanie popiołu                                                                            | 207 •      |
| 6.4.3.    | Usuwanie zanieczyszczeń                                                                     | 209 •      |
| 6.4.4.    | Przetwarzanie/wzbogacanie gazu syntezowego                                                  | 212        |
| 6.4.5.    | Kierunki rozwoju technologii zgazowania biomasy z wykorzystaniem generatorów strumieniowych | 214        |
|           | Literatura.....                                                                             | 220        |
| 7.        | Biopaliwa syntetyczne                                                                       | 222        |
|           | Wprowadzenie.....                                                                           | 222        |
| 7.1.      | Synteza Fischera-Tropscha                                                                   | 223        |
| 7.1.1.    | Model kinetyczny syntezy węglowodorów                                                       | 226 •      |
| 7.1.2.    | Produkty syntezy Fischera-Tropscha                                                          | 227        |
| 7.2.      | Warunki syntezy Fischera-Tropscha                                                           | 229        |
| 7.2.1.    | Katalizatory                                                                                | 229 •      |
| 7.2.2.    | Temperatura i ciśnienie                                                                     | 230        |
| 7.3.      | Reaktory do syntezy Fischera-Tropscha                                                       | 231        |
| IX        |                                                                                             |            |
| 7.4.      | Systemy wytwarzania biopaliw z wykorzystaniem syntezy Fischera-Tropscha.                    | 234        |
| 7.5.      | Metanol i jego pochodne                                                                     | 236        |
| 7.5.1.    | Budowa i właściwości                                                                        | 236 •      |
| 7.5.2.    | Synteza metanolu                                                                            | 238 •      |
| 7.5.3.    | Synteza dimetyloeteru                                                                       | 241 •      |
| 7.5.4.    | Synteza alkoholi mieszanych                                                                 | 242 •      |
| 7.5.5.    | Wytwarzanie etanolu                                                                         | 244        |

|                                                                                       |                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Literatura.....                                                                       | 245                                 |
| <b>8. Piroliza biomasy</b>                                                            | <b>247</b>                          |
| Wprowadzenie.....                                                                     | 247                                 |
| 8.1. Piroliza biomasy lignocelulozowej                                                | 247                                 |
| 8.2. Wpływ warunków termicznych na pirolizę biomasy                                   | 250                                 |
| 8.3. Podział metod pirolizy i ich charakterystyka                                     | 251                                 |
| 8.4..... Pirolizery                                                                   | 254                                 |
| 8.5. Produkty pirolizy                                                                | 262                                 |
| 8.6.. Systemy pirolizy                                                                | 265                                 |
| 8.7. Wzbogacanie biooleju                                                             | 268                                 |
| 8.8. Wybrane systemy produkcji oleju pirolitycznego                                   | 271                                 |
| Literatura.....                                                                       | 272                                 |
| <b>9. Technologie biowodoru</b>                                                       | <b>275</b>                          |
| Wprowadzenie.....                                                                     | 275                                 |
| 9.1. Wytwarzanie biowodoru z biomasy z wykorzystaniem metod termochemicznych..        | 277                                 |
| 9.1.1. Wytwarzanie biowodoru z syngazu                                                | 278 • 9.1.2.                        |
| Wytwarzanie biowodoru z biomasy metodą pirolizy                                       | 281 • 9.1.3.                        |
| Wytwarzanie biowodoru z biomasy metodą hydrotermalnego zgazowania (SCWG)              | 281                                 |
| 9.2. Wytwarzanie biowodoru metodami biotechnologicznymi                               | 282                                 |
| 9.2.1. Produkcja biowodoru metodą fermentacji ciemnej                                 | 283 •                               |
| 9.2.2. Fotofermentacja                                                                | 289                                 |
| 9.3. Biologiczna konwersja tlenku węgla z wytworzeniem biowodoru z wody (reakcja WGS) | 293                                 |
| 9.4..... Biofotoliza                                                                  | 294                                 |
| Literatura.....                                                                       | 294                                 |
| <b>10. Biopaliwa 3. i 4. generacji</b>                                                | <b>297</b>                          |
| Wprowadzenie.....                                                                     | 297                                 |
| 10.1. Wytwarzanie biomasy glonów w procesie fotosyntezy                               | 298                                 |
| 10.2. Fotosyntetyczna produkcja lipidów do wytwarzania biopaliw                       |                                     |
| 3. generacji .....                                                                    | 300                                 |
| 10.3. Wytwarzanie biowodoru z udziałem glonów                                         | 302                                 |
| 10.3.1. Biofotoliza bezpośrednia                                                      | 302 • 10.3.2. Biofotoliza pośrednia |
|                                                                                       | 303                                 |
| 10.4. Charakterystyka fotobioreaktorów do syntezy glonów                              | 305                                 |
| 10.4.1. Podstawowe kryteria projektowe                                                | 305 • 10.4.2.                       |
| Rozwiązania konstrukcyjne wybranych typów fotobioreaktorów                            | 308                                 |
| Literatura.....                                                                       | 312                                 |
| Wykaz nazw roślin wyższych                                                            | 315                                 |
| Wykaz nazw glonów, grzybów, drożdży i bakterii                                        | 317                                 |
| Skorowidz.....                                                                        | 319                                 |
| <b>Płyta CD</b>                                                                       |                                     |
| 1. Rośliny wykorzystywane do produkcji biopaliw.                                      |                                     |
| - Drzewa i krzewy                                                                     |                                     |
| - Rośliny oleiste                                                                     |                                     |
| - Rośliny zawierające sacharozę                                                       |                                     |
| - Rośliny zawierające skrobię                                                         |                                     |
| - Trawy                                                                               |                                     |

2. Produkty uboczne z rolnictwa i leśnictwa.

- Odpadowa biomasa drzewna
- Odpadowa biomasa roślin zielnych

3. Literatura

4. Przykłady obliczeń technologicznych.

- Zadanie 1 - Produkcja biodiesla
- Zadanie 2 - Przetwarzanie odpadów
- Zadanie 3 - Wytwarzanie biogazu