



mgr inż. Olga Anna Orynycz

Wpływ skali i struktury systemu produkcyjnego na efektywność energetyczną procesu wytwarzania biopaliwa rzepakowego

*Promotor:
dr hab. n. tech. Andrzej Wasiak
prof. Politechniki Białostockiej*

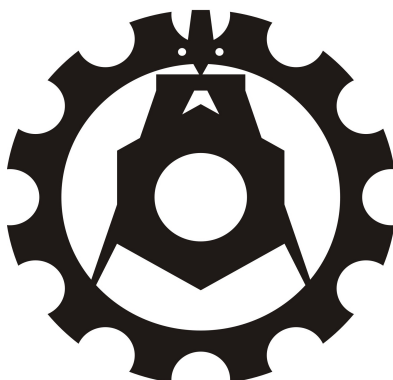
ROZPRAWA DOKTORSKA

Wpływ skali i struktury systemu produkcyjnego na efektywność energetyczną procesu wytwarzania biopaliwa rzepakowego

POLITECHNIKA LUBELSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

ROZPRAWA DOKTORSKA



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 Lublin

mgr inż. Olga Anna Orynycz

Wpływ skali i struktury systemu produkcyjnego na efektywność energetyczną procesu wytwarzania biopaliwa rzepakowego

Promotor:

dr hab. n. tech. Andrzej Wasiak
prof. Politechniki Białostockiej



Politechnika Lubelska
Lublin 2015

Spis treści

Streszczenie	9
Wykaz skrótów i symboli	11
Wstęp	15

I. Część literaturowa

1. Przegląd literatury wytwarzania biopaliw	20
1.1. Studium w zakresie systemu produkcji biopaliw	24
1.2. Energia w transporcie	25
1.3. Potencjalne biologiczne surowce do produkcji biopaliw płynnych ...	33
1.3.1. Uwarunkowania produkcji biopaliwa rzepakowego	37
1.4. Typy biopaliw i dostępne technologie do ich produkcji	46
1.4.1. Produkcja olejów roślinnych	50
1.4.2. Technologie przetwarzania biomasy oleistej	51
1.4.3. Biopaliwa z lignocelulozy	58
1.4.4. Wykorzystanie glonów do produkcji biopaliw	60
1.4.5. Biopaliwa syntetyczne metodą Fishera-Tropscha	63
2. System i jego funkcjonowanie	65
2.1. Charakterystyka organizacji produkcji	82
2.2. Wykorzystanie modelowania do optymalizacji procesu	91
2.3. Charakterystyka wybranych modeli	101
2.3.1. Modele matematyczne	101
2.3.2. Modele empiryczne	105
2.3.3. Modele fizyczne	107
2.3.4. Modele probabilistyczne	107
2.3.5. Modele deterministyczne	108
2.3.6. Modele masowej obsługi	109
3. Podsumowanie części literaturowej	111

II. Część badawcza

4. Wprowadzenie do badań własnych	116
5. Analiza efektywności plantacji energetycznej w podsystemie rolnym	121
5.1. Analiza rzeczywistej plantacji	121
5.2. Model uprawy na większą skalę	146
5.3. Wpływ aspektów technicznych na wydajność energetyczną	150
5.3.1. Wpływ technologii uprawy na wydajność energetyczną plantacji rzepaku z przeznaczeniem na biopaliwa	150
5.3.2. Modelowanie wpływu charakterystyk topologicznych plantacji rzepaku na wydajność energetyczną plantacji	172
6. Podsumowanie pracy badawczej	187
6.1. Wnioski uogólniające	190
Załącznik	192
Literatura	205
Wykaz tabel	213
Wykaz rycin	219

Contents

Abstract	10
List of abbreviations and symbols	11
The introduction	15

I. Literature Part

1. Review of the literature on biofuel's production	20
1.1. Study of the biofuels production system	24
1.2. Energy in transportation	25
1.3. Potential biological materials for liquid biofuels production	33
1.3.1. Constrains determining conditions for rapeseed biofuel production	37
1.4. Types of biofuels and available technologies for their production	46
1.4.1. Production of vegetable oils	50
1.4.2. Processing technologies for the oily biomass	51
1.4.3. Biofuels from lignocellulose	58
1.4.4. Utilization of algae for biofuels production	60
1.4.5. Biofuel's synthesis by means of Fisher-Tropsch method	63
2. System and its functioning	65
2.1. Profile of the organization of the production	82
2.2. Utilization of models to optimization of the process	91
2.3. Characterization of selected models	101
2.3.1. Mathematical models	101
2.3.2. Empirical models	105
2.3.3. Physical models	107
2.3.4. Models probabilistic	107
2.3.5. Deterministic models	108
2.3.6. The models of the mass service	109
3. Recapitulation the literature part	111

II. Research Part

4. The introduction to own research	116
5. Analysis of energetic efficiency of plantation in agricultural subsystem	121
5.1. Analysis of the real plantation	121
5.2. Model of tillage on larger scale plantation	146
5.3. Effects of technical aspects on energetic efficiency	150
5.3.1. Tillage technology effect on energetic efficiency of rapeseed plantation dedicated to biofuel	150
5.3.2. Modelling the topological characteristics of rapeseed plantation on the energetic efficiency	172
6. Recapitulation of the research results	187
6.1. Conclusions generalizing	190
 Appendix	 192
Literature	205
List of tables	213
List of figures	219

Streszczenie

Produkcja biopaliw staje się coraz ważniejszą dziedziną gospodarki. Wynika to z polityki państwa, wymagań ochrony środowiska, a także względów ekonomicznych i społecznych. Rozwój tej gałęzi gospodarki może mieć istotny wkład zarówno w zmniejszenie zużycia paliw kopalnych, stworzenie nowych miejsc pracy, jak i zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego i uniezależnienie Kraju od zewnętrznych dostaw surowców energetycznych. Prawidłowy rozwój musi zapewniać uzyskanie wyraźnego zysku energetycznego, do czego niezbędny jest właściwy dobór technologii produkcji, powiązany z lokalnymi uwarunkowaniami surowcowymi, technologicznymi itp. Dobór optymalnych rozwiązań systemu produkcyjnego jest jednym z głównych obszarów zainteresowania inżynierii produkcji, w obszarze, której ulokowana jest obecna praca. Głównym problemem badawczym, sformułowanym jako podstawa do podjęcia badań, jest zależność efektywności energetycznej systemu produkcyjnego od jego struktury i skali produkcji. Problem efektywności energetycznej wynika z konieczności doprowadzania energii umożliwiającej zachodzenie procesów przetwarzania, na każdym etapie produkcji. Efektywność energetyczna jest rozumiana jako stosunek energii uzyskanej w biopaliwie do sumy wkładów energii wprowadzanych na każdym etapie realizacji produkcji.

Celem pracy, w możliwie ogólnym sformułowaniu, jest stworzenie matematycznego modelu zjawisk zachodzących w podsystemie agrotechnicznym, stanowiącym część systemu produkcyjnego biopaliw. Model powinien uwzględniać oddziaływanie podsystemu przemysłowego oraz wpływ doboru technologii i skali produkcji. W pracy sformulowano również szereg celów bardziej szczegółowych, w tym wykorzystanie modelu do zbadania wpływu niektórych czynników produkcyjnych na efektywność energetyczną produkcji rzepaku jako surowca do wytwarzania estrów, stanowiących biopaliwo do silników diesla.

Wyniki pokazują, że skala produkcji przemysłowej oddziałuje głównie poprzez zwiększanie dróg transportu pomiędzy polami plantacji oraz pomiędzy plantacją a zakładem przetwórstwa przemysłowego. Efektywność energetyczna samej plantacji zależy od rodzaju użytych maszyn i innych środków produkcji. Istotną cechą modelu jest dostarczanie ilościowych zależności opisujących wpływ poszczególnych czynników produkcyjnych na efektywność energetyczną. Obliczenia modelowe mogą być przeprowadzone dla dowolnej struktury systemu produkcyjnego i mogą być wykorzystane do optymalizacji tej struktury pod kątem maksymalizacji efektywności energetycznej.

Abstract

Biofuel's production becomes more and more important field of the economy. This results from the state politics, requirements for environmental protection, and also economic as well as social reasons. The development of this branch of the economy might have the essential contribution in both: the decrease of mineral fuels consumption, creation of the workplaces, as well as enlargement of the energetic safety. It also decreases dependence of the country from the external deliveries of energetic resources. The correct development has to assure evident energetic gain through the proper selection of production technology, related to local availability of resources, and technological development. Selection of the optimum solutions of the productive system is one of the main areas of the interest of production engineering, in the area which the present work is placed. The main research problem, formulated as the basis for present investigations, is the dependence of the energetic efficiency of the productive system upon its structure, and upon the scale of production. The problem of energetic efficiency results from the necessity of assuring energy inputs that enable conversion processes on every stage of the production. Energetic efficiency is understood as the ratio of energy received in the form of biofuel to the sum of the contributions of energy introduced on every stage of realization of production.

The aim of the work, in the formulation as general as possible, is the creation of mathematical model describing the phenomena occurring in agro-technical subsystem, which is the part of the biofuel production system. The model should take into account the influence of industrial subsystem, and the influence of selection of production technology as well as the production scale. A number of more detailed goals was also formulated, including utilization of the model for examination of the influence of some production factors on the energetic efficiency of rapeseed production, used as the raw substrate for production of esters, being an example of biofuel for diesel engines.

Results show that industrial production size (scale) affects the efficiency through enlarging roads of transportation among the fields of the plantation and among plantation and the industrial processing facility. The energetic efficiency of the plantation itself depends on the kind of used machines and the type of various production means. Delivery of quantitative dependences describing the influence of individual production factors on energetic efficiency is the essential feature of the model. Model calculations can be conducted for the any structure of the production system and can be used to the optimization of this structure from the viewpoint of the maximization of energetic efficiency.

Wykaz skrótów i symboli

emergy	– udział energii wbudowanej
ETBE	– ang. <i>Ethyl Tertiary Butyl Ether</i>
toe	– tona oleju ekwiwalentnego, energetyczny równoważnik tony ropy naftowej
OZE	– odnawialne źródła energii
FAO	– ang. <i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
FAME	– ang. <i>Fatty Acid Methyl Esters</i>
HTU	– ang. <i>hydrothermal upgrading</i>
RME	– ang. <i>Rapeseed Methyl Esters</i>
BTL	– ang. <i>Biomass-to-liquid</i>
FT	– ang. Fisher-Tropsch
××	– iloczyn kartezjański
I	– zbiór indeksów
V_i	– obiekty systemu
M	– zbiór elementów
S	– struktura systemu
R	– zbiór relacji między cechami obiektów
A	– zespół obiektów
P	– system procesowy
C	– system sterowania
J	– system informacyjny
L	– logistyczny
N	– maszyna, narzędzie
P	– pomieszczenie
I_n, I_p	– wejście
O_n, O_p	– wyjście
$T_1 \div T_6$	– środki techniczne
X	– czynniki produkcji
Y	– wyroby, usługi, odpady, zanieczyszczenia
T	– proces produkcyjny
SS	– struktura systemu
E	– zbiór wyróżnionych podsystemów
W	– własności podsystemów
X	– zbiór obiektów systemu
n	– liczba obiektów systemu
C	– zbiór cech obiektów

T	– macierz transponowana
Q	– zbiór relacji między obiektami systemu i otoczenia
q_{ij}	– liczba dostarczonego materiału z obiektu i do obiektu j
m	– liczba obiektów otoczenia
f_1	– poziom zapasu robót w toku
f_2	– średnia długość cyklu wyrobu
f_3	– średnia długość cyklu wyrobu
f_4	– poziom wykorzystania czasu pracy robotników
f_5	– wielkość przewozów między stanowiskami
f_6	– koszty stanowiskowe
g_1	– liczba detali przyporządkowanych do jednostki produkcyjnej (JP)
g_2	– liczba stanowisk roboczych przyporządkowanych do JP
g_3	– współczynnik obciążenia stanowisk roboczych JP
g_4	– stopień domknięcia specjalizacji przedmiotowej JP
$\sum_{i=1}^m P_{oi}$	– ogólna liczba operacji technologicznych dla wszystkich i -tych wyrobów wykonywana w podsystemie w ciągu jednego miesiąca
L_r	– liczba wykorzystywanych maszyn
N_i	– program miesięczny i -tego wyrobu
t_i	– pracochłonność i -tego wyrobu
F	– miesięczny fundusz pracy maszyn
T	– liczba okresów
V_p	– współczynnik wariancji
ESP	– elastyczne systemy produkcyjne
p	– wektor parametrów
u	– wektor pobudzeń
y	– wektor zmiennych wyjściowych
x	– zmienne stanu
v	– zbiór zmiennych niezależnych
z	– zakłócenia
O	– otoczenie
D	– dochód systemu
C	– koszty funkcjonowania systemu
OP	– operacje
P	– procesy
L	– długość
D	– szerokość
A	– obszar plantacji (powierzchnia uprawy)
d_i	– szerokość pasa terenu obrabianego w jednym ciągu i -tej operacji

a_1	– powierzchnia pojedynczego pasa obróbki
n	– liczba koniecznych do przebycia pasów
C	– długość ukośnego boku
Dr	– przebyta droga
ω_i	– zużycie paliwa na jednostkę przebytej drogi w i -tym zabiegu agrotechnicznym
W_{pal}	– wartość opała paliwa zużywanego w operacjach agrotechnicznych
m	– liczba operacji agrotechnicznych
E_{bio}	– energia otrzymana w postaci biopaliwa
M_{plon}	– masa plonu na jednostkę powierzchni uprawy
γ	– ogólna wydajność masowa biopaliwa z uprawy
α_k	– udział masowy k -tego gatunku biopaliwa
$W_{bio,k}$	– wartość opała k -tego gatunku biopaliwa
$\mathcal{E}$	– efektywność energetyczna
$E_{zuż}$	– energia wydatkowana na uprawę
E_{tr}	– energia zużywana do transportu poza polami
E_{emb}	– ułamek energii zawartej w środkach produkcji zużywany w danej operacji i transporcie
$M_{plon} (c_f, c_w, c_{cp})$	– masa plonu na jednostkę powierzchni uprawy; c_f – nawozów, c_w – wody, c_{cp} – środków ochrony roślin stosowanych podczas uprawy
γ_{i_k}	– ułamek energii „wbudowanej” – zawartej w k -tym środku technicznym, zużyty w i -tej operacji (maszyny, nawozy, itp.)
L_p	– odległość przejechana poza polem w p -tym kursie (długość kursu)
β_p	– jednostkowe zużycie paliwa w czasie kursu p
$W_{pal,tr}$	– wartość opała paliwa wykorzystywanego w transporcie
E_{mt_p}	– ułamek energii zawartej w danym środku transportu zużywany w jednostce pokonywanej odległości
UTU	– uproszczona technologia uprawy
EROEI	– ang. <i>energy return on energy investment</i>
D_{tr}	– odległość jaka może być przebyta poza polem w stosunku do całkowitego zużycia energii w operacjach agrotechnicznych
η_i	– wydajność dla i -tej operacji
E_{agr}	– zużyta energia w i -tej operacji
E_{out}	– wydatki energii na przejazd na pola związane z operacją
I	– ilość operacji przy założeniu, że wszystkie są jednakowe
D_{out}	– przejechana odległość poza polami
D_{agr}	– całkowita odległość przejechana na polu

Wstęp

Wiele względów, technicznych, ekologicznych, jak również politycznych i prawnych skłania do wprowadzania zmian w gospodarce energetycznej. Wśród tych zmian szeroko propagowane jest wykorzystanie alternatywnych źródeł energii, ze szczególnym uwzględnieniem źródeł odnawialnych.

Te ostatnie są to głównie źródła biologiczne, a więc różne rodzaje biomasy. Analiza literatury wskazuje na szereg problemów związanych z wykorzystaniem biomasy do celów energetycznych. Wskazywane są problemy wynikające z konkurencji różnych technicznych zastosowań biomasy (energetyczne, materiałowe) z zastosowaniami spożywczymi. Dyskutowanych jest także wiele problemów ekonomicznych.

Bogata literatura dotycząca różnorodności technologicznych aspektów energetycznego wykorzystania biomasy na ogół nie podejmuje zagadnienia efektywności energetycznej procesów przetwarzania, a w szczególności nie dostarcza dogłębnej analizy wpływu różnych czynników produkcyjnych na tę efektywność. Samo wytwarzanie biomasy, jak też przetwarzanie jej w biopaliwo wiąże się z koniecznością doprowadzenia energii w celu umożliwienia dokonania każdego z procesów technologicznych. W sytuacji zamiaru, bądź konieczności zamiany kopalnych źródeł energii na biomasowe istotnym jest taki dobór procesów technologicznych, w którym można uzyskać wyraźny zysk energii, tj. suma ilości energii wkładanej w poszczególnych procesach technologicznych musi być mniejsza od ilości energii uzyskanej w postaci biopaliwa. Konieczne jest również wypracowanie narzędzi umożliwiających ocenę technologii pod tym względem i stwarzających możliwość doboru technologii produkcji zapewniającej optymalny zysk energetyczny.

Należy również zwrócić uwagę na fakt, iż istnienie różnorodnych ekonomicznych instrumentów zachęty (certyfikaty pochodzenia, dopłaty bezpośrednie, dotacje do inwestycji, itp.) mogą tworzyć fałszywy obraz opłacalności procesów. W skrajnym przypadku proces opłacalny ekonomicznie mógłby nie przynosić zysku energetycznego.

Kolejny aspekt, to struktura systemu produkcyjnego. W przypadku produkcji biopaliw system produkcyjny składa się z podsystemów o wyraźnie odrębnych charakterystykach: podsystemu agrotechnicznego i podsystemu przemysłowego. Każdy z tych podsystemów składa się z innych elementów i można spodziewać się występowania innych oddziaływań między tymi elementami.

Oddziaływania te nigdzie nie były badane w aspekcie ich wpływu na wydajność energetyczną systemu produkcyjnego.

W literaturze przedmiotu brak systematycznych badań efektywności energetycznej procesów wytwarzania biopaliw. Nie są również sprecyzowane zależności efektywności energetycznej od różnych czynników produkcyjnych. Stąd podjętymi w tej pracy **problemami badawczymi** wymagającymi rozstrzygnięcia są:

1. **Niezbyt precyzyjnie zdefiniowane wskaźniki efektywności energetycznej.**
2. **Brak identyfikacji czynników wpływających na efektywność energetyczną produkcji biopaliw w systemach produkcyjnych o różnej strukturze i różnej skali.**
3. **Potrzeba identyfikacji i określenia znaczenia czynników decydujących o przydatności badanej technologii produkcji.**
4. **Brak ilościowego określenia zależności efektywności energetycznej od poszczególnych czynników produkcyjnych.**

Obecna praca jest samoistną częścią szerszej zakrojonych badań nad wpływem poszczególnych parametrów charakterystyk elementów struktury systemu produkcyjnego biopaliw oraz oddziaływań pomiędzy tymi elementami na efektywność energetyczną systemu. Można tu postawić następującą **hipotezę badawczą: Skala i struktura systemu produkcyjnego decydują o efektywności energetycznej procesu wytwarzania biopaliwa.**

Zakres pracy ograniczono głównie do badania podsystemu agrotechnicznego. Elementami jego struktury są plantacje złożone z odrębnych pól, środki techniczne (maszyny) o różnych charakterystykach, inne środki produkcji oraz oddziaływania wewnątrz podsystemu i z jego otoczeniem, a w szczególności z podsystemem industrialnym. Oddziaływania te dotyczą powiązań transportowych, energetycznych oraz operacji agrotechnicznych.

Celem obecnej pracy jest wytworzenie wiedzy dotyczącej wpływu struktury i skali podsystemu agrotechnicznego na jego efektywność energetyczną dla produkcji biopaliwa rzepakowego.

Zakres badań:

1. Badanie wpływu czynników technologicznych na efektywność różnych wariantów agrotechnicznego podsystemu rolnego (wielkość plantacji, stopień rozdrobnienia, właściwości maszyn).
2. Badanie istoty relacji pomiędzy podsystemem rolnym a przemysłowym.
3. Badanie charakteru relacji pomiędzy podsystemem rolnym a przemysłowym.
4. Badanie wpływu skali systemu produkcyjnego na efektywność energetyczną.

Z tak postawionego problemu badawczego wynikają zasadnicze zadania badawcze:

1. Analiza literatury technicznej dotycząca metod produkcji biomasy i jej konwersji na biopaliwa
2. Zdefiniowanie wskaźników efektywności energetycznej.
3. Identyfikacja struktur i określenie specyfiki badanego systemu produkcyjnego.

4. Identyfikacja czynników oddziałujących na procesy zachodzące w systemie produkcyjnym.
5. Zbudowanie modelu matematycznego opisującego zależność wydajności energetycznej od charakterystyk elementów struktury systemu produkcyjnego.
6. Stworzenie programu komputerowego umożliwiającego wyznaczanie sprawności energetycznej podsystemu rolnego dla konkretnych warunków.
7. Komputerowe modelowanie wpływu poszczególnych czynników na efektywność energetyczną.
8. Ocena udziału energii wbudowanej („emergy”) na sprawność energetyczną plantacji.
9. Analiza wpływu rozdrobnienia pól plantacji na jej wydajność energetyczną.
10. Analiza wpływu metod uprawy i rodzaju narzędzi agrotechnicznych na wydajność energetyczną.
11. Analiza energochłonności produkcji biopaliw.
12. Analiza numeryczna wpływu wielkości i struktury plantacji na efektywność energetyczną.
13. Modelowanie wpływu doboru technologii produkcji na wydajność energetyczną produkcji biopaliw.

Do realizacji badań w pracy zastosowano następujące metody:

- zbudowanie modelu matematycznego opisującego istotę procesów zachodzących w podsystemie rolnym
- przeprowadzenie obliczeń numerycznych dla różnych wariantów charakterystyk elementów podsystemu,
- identyfikację i ilościową analizę znaczenia poszczególnych czynników i procesów występujących w produkcji biopaliwa na efektywność energetyczną podsystemu.

Z powyższych celów zadań wynika, że badany problem leży w dziedzinie naukowej inżynierii produkcji, która zgodnie z ekspertyzą Komitetu Inżynierii produkcji PAN, obejmuje m.in. takie zagadnienia jak: planowanie, projektowanie, implementowanie i zarządzanie systemami produkcyjnymi, systemami logistycznymi oraz zabezpieczanie ich funkcjonowania

Zgodnie z treścią ww. ekspertyzy w dyscyplinie inżynieria produkcji mieszczą się m.in. następujące obszary prac naukowo-badawczych:

- projektowanie procesów wytwarzania
- organizacja procesów produkcyjnych
- zarządzanie produkcją
- optymalizacja przepływów materiałowych, informacyjnych i finansowych poprzez sieć organizacji
- procesy zarządzania przetwarzaniem materiałów na wyroby użytkowe;

- modelowanie i symulacja komputerowa projektowania produktów, projektowania procesów, projektowania logistyki produkcji oraz zarządzania projektami. Modelowanie i symulacja mogą znaleźć zastosowanie nie tylko przy projektowaniu nowych systemów produkcyjnych, ale również przy restrukturyzacji systemów zarządzania, jako narzędzia wspomagające analizę przebiegu przepływów: materiału, informacji, zasobów ludzkich i finansów w przedsiębiorstwie. Zbudowanie takiego kompleksowego modelu umożliwia sprawdzenie wpływu każdej zmiany na funkcjonowanie systemu produkcyjnego.

Cele i zakres pracy, a szczególnie wykorzystanie modelowania matematycznego i numerycznego, komputerowego do badania wpływu struktury systemu produkcyjnego i relacji w nim zachodzących na wydajność energetyczną procesów wytwarzania biopaliwa **pokrywają się z tematyką badawczą postulowaną jako obszar badań inżynierii produkcji.**

Praca składa się z części literaturowej, w której omówiono podstawy teorii systemów i modelowania oraz zagadnienia dotyczące produkcji biopaliw, ze szczególnym uwzględnieniem paliwa rzepakowego do silników wysokoprężnych (biodiesel) oraz części badawczej zawierającej wyniki własnych badań, w których zawarto wstępne obliczenia numeryczne, sformułowanie modelu matematycznego, obliczenia efektywności energetycznej dla plantacji jednopolowej i złożonej z wielu odległych pól, ocenę dopuszczalnej odległości transportu pomiędzy plantacją a zakładem przetwórczym oraz modelowanie wpływu odległości pomiędzy polami i wpływu charakterystyk maszyn agrotechnicznych na wydajność energetyczną subsystemu.

Opisane w rozdziale 2 metody inżynierii systemowej dały logiczną podstawę do identyfikacji elementów systemu produkcji biopaliw. Stanowiły więc osnowę dla formułowania modelu matematycznego, zdefiniowania występujących zmiennych oraz relacji – szczególnie pomiędzy podsystemami rolnym i przemysłowym.

Ogólna idea modelu stwarza możliwość uwzględnienia wszystkich istotnych dla systemu zmiennych. Umożliwia więc późniejsze połączenie uzyskanych wyników z przyszłymi, które będą szczegółowo dotyczyły podsystemu przemysłowego.

Na poszczególnych etapach konstruowania modelu i przeprowadzania obliczeń przyjęto następujący schemat rozumowania:

- pierwsze przybliżenie uwzględniało wpływ operacji agrotechnicznych wstępujących we wszystkich strukturach podsystemu,
- w dalszych etapach dodano czynniki występujące tylko w niektórych strukturach np. duża, rozdzielona plantacja.

Praca zakończona jest podsumowaniem zawierającym wnioski z dokonanych badań. Ponadto do pracy dołączono załącznik zawierający analizę opłacalności ekonomicznej wytwarzania bioestru na własne potrzeby gospodarstwa.

I
Część literaturowa

1. Przegląd literatury wytwarzania biopaliw

Wzrost poziomu życia ludności związany z postępem cywilizacyjnym zwiększa zapotrzebowanie na energię, a to z kolei zmusza do poszukiwań nowych źródeł energii. Wyczerpywanie zasobów surowcowych, uzależnienie od zewnętrznych dostawców, rosnące ceny, zapotrzebowanie gospodarki na paliwa i energię, zmiany klimatu zmuszają do poszukiwań nowych źródeł energii, a co za tym idzie wytwarzania paliw alternatywnych.

Zaspokojenie potrzeb energetycznych wymaga zachowania odpowiednich proporcji między postępem a ochroną środowiska, świadomego korzystania z bogactw naturalnych i alternatywnych źródeł energii. Szacuje się, że nasza cywilizacja zużyła energię, która odpowiada około 500 mld tpu¹, z czego 2/3 przypada na ostatnie stulecie.

Istotnym problemem staje się nie tylko zapotrzebowanie na energię, ale zapotrzebowanie na określoną postać jej nośnika. Głównym surowcem do produkcji paliw jest ropa naftowa, która nadal odgrywa największą rolę jako składnik bilansu energetycznego. Jej ubywanie może stanowić czynnik destabilizujący rozwój gospodarczy świata do czasu upowszechnienia innego źródła paliw płynnych w transporcie. Szansą na rozwiązanie problemów paliwowych może stać się rozwój technologii czystych źródeł energii pochodzących z nośników będących zasobami odnawialnymi. Problemy związane ze stosowaniem różnych rodzajów biomasy jako źródła energii są szeroko omawiane w literaturze, m. in. bilans energetyczny również brany jest pod uwagę.

W pracy² podkreślono, że biomasa jest ważnym czynnikiem gospodarki światowej. Biomasa jest również źródłem wielu różnych produktów chemicznych, materiałów i energii elektrycznej lub paliw. W produkcji np. pulpy bądź papieru nie tylko sam wyrób powstaje z biomasy, ale również ok. 60% potrzebnej energii procesowej uzyskiwane jest poprzez spalanie biomasy. Z kukurydzy produkuje się szeroką gamę produktów a przemysł rafineryjny używa jej do produkcji paliwa etanolowego dla transportu. Przemysł oparty na biomase może także wytwarzać etanol przez fermentację produktów ubocznych powstających przy produkcji cukru. Potencjalnym źródłem etanolu jest również biomasa lignocelulozowa, która nie jest bezpośrednio wykorzystywana do produkcji żywności. Ponadto zgazowanie biomasy prowadzi do otrzymywania metanolu, mieszanych alkoholi i innych substancji palnych. Postęp nauk biologicznych

¹ Tona paliwa umownego lub in. tona oleju ekwiwalentnego, stosowana w bilansach międzynarodowych jednostka miary energii. Jedna tona oleju umownego równa jest 41,868 GJ lub 11,63 MWh; M. Ligus, Efektywność inwestycji w odnawialne źródła energii, Warszawa, Wydawnictwa Fachowe, 2010, s. 103–109.

² H. M. Chum, R. P. Overend, *Biomass and Renewable Fuels*, [W:] Fuel Processing Technology, 71, 2001, p. 187–195.

w przyszłości może radykalnie zmienić właściwości roślin i także zmienić gamę produktów z nich otrzymywanych. Rośliny dostosowane specjalnie do produkcji pożądaných produktów i energii mogą być stworzone w drodze modyfikacji genetycznej. Układy biologiczne mogą także być wykorzystywane do wytwarzania paliw, takich jak wodór.

Relacje pomiędzy uzyskiwaniem paliw, pasz i nawozów posłużyły do analizy systemu energetycznego obszarów wiejskich i stworzenia liniowego modelu wykorzystanego do symulacji i analizy wpływu różnych sytuacji w systemie energetyki wiejskiej w warunkach specyficznych dla klimatu Indii, co przedstawiono w artykule.³

Wykorzystanie pozostałości rolniczych powłoki palmy, które mogą być użyte do przekształcenia w bioolej za pomocą procesu pirolizy prowadzonej w różnych warunkach omówiono w publikacji.⁴ Tymczasem w pracy⁵ zaproponowano komputerowy system wspomagania decyzji wykorzystujący arkusz kalkulacyjny. Program umożliwia ocenę techniczno-ekonomiczną wykorzystania biomasy do produkcji energii elektrycznej oraz do wytwarzania etanolu. Parametry techniczne i ekonomiczne mogą być oceniane dla różnych surowców. W niektórych opracowaniach literaturowych, analizujących technologie produkcji, uwzględniany jest również czynnik transportu biomasy.

W artykule⁶ omówiono wykorzystanie jako paliwa słomy zbożowej, odnawialnej biomasy o znacznym potencjale, występującej w większości krajów. Zwrócono uwagę na fakt, że systemy zbierania, transportu, przeładunku i konwersji wymagają nakładów paliw kopalnych. Oceniono, że słoma jako odpad z produkcji spożywczej zapewnia korzystniejszy bilans energetyczny.

Efektywność energetyczną produkcji i transportu różnych rodzajów biomasy w warunkach rolnictwa Szwecji przeanalizowano w pracy.⁷ Omówiono także zmiany w zakresie efektywności energetycznej przy zamianie paliw kopalnych na biomasę. Najwyższą wydajność energetyczną w obecnych warunkach produkcji uzyskuje się w lesie krótkiej rotacji (*Salix*) oraz plantacjach buraków cukrowych, a najniższą w przypadku rzepaku, pszenicy i ziemniaków. Przeanalizowano również wpływ wykorzystania różnych środków transportu na wydajność energetyczną zrębków wierzby *Salix*.

³ J. P. Painuly, H. Rao, J. Parikh, *A rural energy – agriculture interaction model applied to Karnataka state*, [W:] Energy, vol. 20, no. 3, 1995, p. 219–233.

⁴ F. Abnisa, W.M.A. Wan Daud, W.N.W. Husin, J.N. Sahu, *Utilization possibilities of palm shell as a source of biomass energy in Malaysia by producing bio-oil in pyrolysis process*, [W:] Biomass and Bioenergy, 35, 2011, p. 1863–1872.

⁵ C.P. Mitchell, A.V. Bridgwater, D.J. Stevens, A.J. Toft, M.P. Watters, *Technoeconomic assessment of biomass to energy*, [W:] Biomass and Bioenergy, vol. 9, no. 1–5, 1995, p. 205–226.

⁶ D. Nilsson, *Energy, Exergy and Emergy analysis of using straw as fuel in district heating plant*, [W:] Biomass and Bioenergy, vol. 13, no. 1–2, 1997, p. 63–73.

⁷ P. I. I. Börjesson, *Emergy Analysis Of Biomass Production and Transportation*, [W:] Biomass and Bioenergy, vol. 11, no. 4, 1996, p. 305–318.

Konieczność realizacji zobowiązań międzynarodowych, zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego i konkurencyjności zobowiązuje do poszukiwań technologii pozyskiwania i przetwarzania energii szczególnie ze źródeł odnawialnych. Wytwarzanie biopaliw wymaga współdziałania różnych branż gospodarki od specjalistycznego rolnictwa do przemysłu z wieloma wariantami pośrednimi. Z tych względów zauważa się wzrastające zainteresowanie produkcją biopaliw zarówno zespołów badawczych, jak i korporacji przemysłowych oraz użytkowników środków transportu.

O tym, jak wielką uwagę poświęca się problematyce produkcji biopaliw, świadczą krajowe i międzynarodowe konferencje, kongresy, sympozja (np. *2nd International Congress on Biodiesel* – Germany 2009; *Biofuels International Conference* – Belgium 2013; *Oils & Fats* – Germany 2013; *Future of European Biofuels – policy, environment and technology* – 2013; *Expobioenergia* – Spain 2013; *National Biodiesel Conference&Expo* – San Diego, CA 2014; *Advanced Biofuels Leadership Conference* – National Harbor, MD 2014).

Alternatywą tradycyjnych paliw w transporcie stają się różnego rodzaju biopaliwa ciekłe przeznaczone do obrotu publicznego, które mogą, przynajmniej przez pewien czas, stanowić nowe źródło energii dla rynku motoryzacji. Paliwa alternatywne w energetyce, jak i transporcie, w perspektywie najbliższych 20 lat będą oparte, na ile to możliwe, na biomasie.⁸ Spośród alternatywnych źródeł energii bioenergetyka jest jednym z tych, które stwarzają nowe perspektywy dla sprawnego funkcjonowania transportu w trzech wymiarach: energetycznym, ekologicznym i gospodarczym. Biopaliwa przeznacza się dla flot pojazdów, a także rolników indywidualnych, którzy we własnych gospodarstwach mogą uprawiać biomasę i w ograniczonym zakresie przetwarzać na biopaliwo stymulując rozwój nowych źródeł biopaliw. Sprawia to, że biokomponenty, biopaliwa ciekłe stanowiące substytuty paliw ropopochodnych, odgrywają coraz większą rolę w polityce energetycznej. Z punktu widzenia definicji prawnych do biopaliw należy zaliczyć:

- benzyny silnikowe zawierające powyżej 5,0% objętościowo biokomponentów lub powyżej 15,0% objętościowo eterów,
- olej napędowy (ON) zawierający powyżej 5,0% objętościowo biokomponentów,
- ester, biometanol, bioetanol, dimetyloeter oraz czysty olej roślinny stanowiące samoistne paliwo,
- biopaliwa syntetyczne – syntetyczne węglowodory, mieszanki syntetycznych węglowodorów, które są wytwarzane z biomasy jako samoistne paliwo,
- biowodór – wodór pozyskiwany z biomasy,
- biogaz – gaz pozyskany z biomasy.⁹

⁸ A. Chochowski, F. Krawiec, *Zarządzanie w energetyce*, Warszawa, Difin, 2008.

⁹ Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o biokomponentach i biopaliwach ciekłych, Dz. U. nr 169, poz. 1199, z późn. zm.

W literaturze przedmiotu został również przyjęty podział biopaliw na generacje: pierwszą, drugą i trzecią. Charakterystykę biopaliw 1 i 2 generacji zawarto w raporcie *Biofuels in the European Union. A vision for 2030 and beyond*. Do biopaliw pierwszej generacji zalicza się: biodiesel, bioetanol, czyste oleje roślinne, biogaz, bio – ETBE. Paliwa te są, jak dotąd, używane samodzielnie lub jako dodatek do paliw węglowodorowych (w Brazylii samodzielnie jako etanol, w USA jako dodatek tzw. gazozol¹⁰). Stosowanie zbóż, sacharozy, olejów roślinnych i tłuszczów zwierzęcych jako surowców do produkcji wymienionych paliw wywołuje silny sprzeciw. Uważa się, że wykorzystanie tych surowców prowadzi w konsekwencji do wzrostu cen żywności. Złagodzenie konkurencji w aspekcie „żywność – energia” jest możliwe wtedy, gdy źródłem biomasy staną się rośliny nie przeznaczone na cele żywieniowe, przeważnie uprawiane na gruntach marginalnych, mało przydatnych dla rolnictwa spożywczego. Założenia te mogą spełniać biopaliwa drugiej generacji, wytwarzane z roślin uprawianych na cele niekonsumpcyjne oraz z odpadów. Do tej grupy zalicza się: bioetanol z biomasy lignocelulozowej, biopaliwa syntetyczne ciekłe, bioolej, biowodór. Pomimo zastrzeżeń i wątpliwości poszukuje się innych metod pozyskiwania biopaliw. Oprócz wymienionych biopaliw pierwszej i drugiej generacji przewiduje się rozwój i trzeciej. Coraz większe zainteresowanie wzbudza produkcja syntetycznych węglowodorów.¹¹

¹⁰ E. Grzywa, J. Molenda, *Technologia podstawowych syntez organicznych*, Warszawa, WNT, t. 1, 2000, s. 111–112.

¹¹ Y. Li, M. Horsman, N. Wu, C.Q. Lan, N. Dubois-Calero, *Biofuels from microalgae*, [W:] *Bio-technology progress*, nr 24, 2008, p. 815–820; S.N. Naik, V.V. Goud, P.K. Rout, A.K. Dalai, *Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review*, [W:] *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nr 14, 2010, p. 578–597; A. Eisentraut, *Sustainable Production of Second – Generation Biofuels – Potential and perspectives in major economies and developing countries*, International Energy Agency, 2010, p. 23–26; H. Eggert, M. Greaker, *Promoting Second Generation Biofuels: Does the First Generation Pave the Road?*, [W:] *Energies*, nr 7, 2014, p. 4430–4445; B. Burczyk, *Biomasa – surowiec do syntez chemicznych i produkcji paliw*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011, s. 201–203; E. Klimiuk, M. Pawłowska, T. Pokój, *Biopaliwa – technologie dla zrównoważonego rozwoju*, Warszawa, PWN, 2012, s. 4–5.

1.1. Studium w zakresie systemu produkcji biopaliw

W ostatnich publikacjach zostało przedstawionych szereg technologii rolniczych.¹² Podręcznik¹³ zawiera wiele danych technicznych maszyn rolniczych oraz zużycia paliwa podczas ich eksploatacji. W dotychczasowej literaturze przedmiotu nie przedstawiono badań dotyczących wyznaczenia, w ogólnym bilansie energetycznym wytwarzania biopaliw, udziału energii zużytej w poszczególnych operacjach technologicznych, zarówno na etapie produkcji rolnej, jak i na etapie przetwarzania uzyskanego surowca. Biorąc pod uwagę, że różne technologie produkcji biopaliw są już w użyciu, a badania nowych technologii są przeprowadzane można sądzić iż informacje o wspomnianym wyżej udziale mogłyby stanowić istotny element doboru technologii produkcji.

W artykule¹⁴ płynne biopaliwa pierwszej generacji porównywano przy wykorzystaniu ich jako substytutów oleju napędowego w elektrociepłowni średniej mocy 340 kW. Wykazano, że silnik wysokoprężny napędzany estrem metylo-owym oleju rzepakowego uzyskuje korzystniejsze, niż w przypadku oleju napędowego, cechy emisji przy analogicznym bilansie energetycznym. Ponadto w pracy¹⁵ podjęto próbę oceny biodiesla i wykorzystania dostępnych zasobów, oceny procesów wytwarzania, a także wydajności biopaliw w istniejących silnikach. Omówiono także kwestie ochrony środowiska, aspekty gospodarcze, korzyści i bariery w stosowaniu biodiesla. Z kolei w publikacji¹⁶ przedstawiono zintegrowaną ocenę oddziaływania na środowisko niektórych upraw promowanych w Grecji i wytwarzanych z nich produktów, będących potencjalnymi surowcami do produkcji ciekłego biopaliwa. Przeanalizowano uprawy rzepaku, soi, słonecznika i bawełny, hodowanych w warunkach rolniczych. Oceniono również główne procesy przemysłowe stosowane w Grecji do wydobywania, przetwarzania i estryfikacji oleju roślinnego z nasion.

¹² T. Juliszewski, T. Zając, *Biopaliwa rzepakowe*, Poznań, PWRiL, 2007, s.49–51; Z. Jasińska, A. Kolečki, *Szczegółowa uprawa roślin 2*, Wrocław, Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 1999, s. 412–434; B. Igliński, R. Buczkowski, M. Cichosz, *Technologie bioenergetyczne*, Toruń, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, 2009, s. 218–223; Indywidualne gospodarstwo rolne (mała skala produkcji na potrzeby własne) – informacja prywatna; T. Perrier, *Informacja prywatna z przedsiębiorstwa rolnego*, „Barycz”, 2014.

¹³ E. Lorencowicz, *Poradnik użytkownika techniki rolniczej w tabelach*, Bydgoszcz, Agencja Promocji Rolnictwa i Agrobiznesu, 2012.

¹⁴ L. Raslavicius, Z. Bazaras, *Ecological assessment and economic feasibility to utilize first generation biofuels in cogeneration output cycle*, [W:] *Energy*, nr 35, 2010, p. 3666–3673.

¹⁵ B.K. Barnwal, M.P. Scharma, *Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India*, [W:] *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nr 9, 2005, p. 363–378.

¹⁶ G. Fontaras, V. Skoulou, G. Zanakis, A. Zabaniotou, Z. Samaras, *Integrated environmental assessment of energy crops for biofuel and energy production in Greece*, [W:] *Renewable Energy*, nr 43, 2012, p. 201–209.

1.2. Energia w transporcie

Wzrost liczby samochodów będzie przyczyniał się do zwiększania zapotrzebowania na energię, a więc i zużycie ropy naftowej. Transport jest odbiorcą 25% łącznej światowej energii.¹⁷ Stwarza to problemy związane ze wzrostem zanieczyszczeń środowiska naturalnego, a szczególnie atmosfery, wymuszając zwiększanie wymagań w zakresie jego ochrony. Równocześnie, wiele sygnałów wskazuje na wyczerpywanie, przynajmniej tych najbardziej dostępnych, źródeł ropy naftowej. Dlatego konieczne jest prowadzenie badań nad poszukiwaniem paliw zastępczych. Prowadzone są zarówno poszukiwania nowych źródeł paliw kopalnych (np. gaz łupkowy), jak i paliw alternatywnych.

Wzrostowi gospodarczemu na świecie nadal towarzyszy wzrost zapotrzebowania na energię, w tym zużywaną w różnych środkach transportu. W 2007 r. w 27 krajach UE zużycie energii finalnej wyniosło 1157,7 Mtoe, przy produkcji energii brutto na poziomie 1806 Mtoe (toe – tona oleju ekwiwalentnego, energetyczny równoważnik tony ropy naftowej), co wyniosło 15,5% produkcji na świecie. W tym 377,2 Mtoe (32,6%) zużył transport, 322,9 Mtoe (27,9%) przemysł, 284,6 Mtoe (24,6%) gospodarstwa domowe i rolnictwo, 145 Mtoe (12,5%) sam sektor usług. W sumie produkcja energii brutto pochodziła w: 36,4% z paliw płynnych, 24% z paliw gazowych, 18% z paliw stałych, 13,4% z energii nuklearnej, 5,4% z biomasy, 1,5% z hydroenergii. Sektor transportu jest najbardziej energochłonnym działem gospodarki UE, który w roku 2007 zużył 377 mln ton energii końcowej.¹⁸ Zużycie poszczególnych paliw płynnych, w tym biopaliw, przedstawia tab. 1.

Biorąc pod uwagę powyższą tabelę można stwierdzić, że znaczące zużycie przypada na ON. Udział biopaliw jest niewielki, a w tym zakresie dominuje biodiesel.¹⁹ Na przestrzeni ostatnich lat w Polsce produkcja i zużycie olejów napędowych wzrosła. Jak wynika z zestawienia danych zawartych w tab. 2 najniższa produkcja miała miejsce w latach 2001–2004, która w kolejnych latach uległa przyspieszeniu. Podobna tendencja, w przypadku samej produkcji, utrzymywała się na świecie w latach 2000–2003.

¹⁷ G. Jastrzębska, *Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne*, Warszawa, WNT, 2007.

¹⁸ E. Menes, D. Słoński, *Energochłonność i emisja dwutlenku węgla generowana przez transport krajów tworzących UE*, [W:] *Transport samochodowy*, nr 2, 2010, s. 17–24.

¹⁹ O. A. Orynycz, *Produkcja biopaliw ciekłych, jako źródła energii dla transportu*, [W:] *Energetyka i ekologia*, nr 8, 2012, s. 471–475.

Tab. 1. Zużycie finalne paliw ciekłych w transporcie w UE w 2007 r., [ktoe]

	Zużycie ON i benzyny przez transport	W tym benzyn	W tym ON	Udział biopaliw w zużyciu ON i benzyny przez transport	Biopaliwa	W tym w benzynie	W tym w oleju napę- dowym	Inne biopaliw płynne (*)
EU-27	303131	106533	196598	2,6%	7878	1187	6675	15
Belgia	8268	1468	6800	1,1%	87		87	
Bułgaria	2013	627	1386	0,1%	2			2
Czechy	5929	2208	3721	0,5%	30		30	
Dania	4529	1881	2647	0,1%	6	6		
Niemcy	47707	21671	26036	8,4%	3994	296	3698	
Estonia	805	338	467					
Irlandia	4671	1915	2756	0,5%	21	3	16	2
Grecja	7030	4317	2713	1,2%	85		85	
Hiszpania	35170	7020	28150	1,1%	386	114	273	
Francja	41514	9783	31731	3,5%	1473	279	1194	
Włochy	37835	12412	25423	0,4%	141		141	
Cypr	657	370	287	0,1%	1		1	
Łotwa	1216	427	787	0,1%	2		2	
Litwa	1434	437	997	3,6%	52	11	42	
Luksemburg	2137	453	1684	1,7%	36	1	35	
Węgry	4257	1611	2645	0,7%	29	27	2	
Malta	155	67	88					
Holandia	11226	4387	6840	2,8%	311	88	223	
Austria	7592	2035	5557	2,9%	218	17	191	10
Polska	12059	4249	7810	0,8%	96	72	25	
Portugalia	6001	1638	4363	2,2%	133		133	
Rumunia	4285	1549	2736	0,9%	40		40	
Słowenia	1692	648	1044	0,8%	13		13	
Słowacja	1813	644	1169	4,9%	89	12	77	
Finlandia	4350	1958	2392	0,0%	1	1		
Szwecja	7257	3897	3360	3,9%	285	182	102	
W. Brytania	41531	18521	23009	0,8%	346	77	268	

(*) biopaliwa używane samoistnie

Źródło: European Commission, *EU energy and transport in figures*, Statistical Pocketbook 2010.

Tab. 2. Produkcja i zużycie olejów napędowych w Polsce

Wyszczególnienie	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Zużycie olejów napędowych w transporcie w tys. t	2343	2562	2940	3606	4303	5075	6010	7223	8120	8358	9320	9583	.
Produkcja olejów napędowych w t	5830523	5258398	4484164	4784503	5323480	6144294	7459864	7573438	8529156	9016187	9892796	10738855	10927412

(.) – zupełny brak informacji albo brak informacji wiarygodnych

Źródło: Główny Urząd Statystyczny, *Gospodarka paliwowo-energetyczna w latach 2010, 2011*, Warszawa, 2012, s. 257; Główny Urząd Statystyczny, *Gospodarka paliwowo-energetyczna w latach 2009, 2010*, Warszawa, 2011, s. 257; Główny Urząd Statystyczny, *Gospodarka paliwowo-energetyczna w latach 2007, 2008*, Warszawa, 2009, s. 243; Główny Urząd Statystyczny, *Gospodarka paliwowo-energetyczna w latach 2005, 2006*, Warszawa, 2007, s. 235; Główny Urząd Statystyczny, *Gospodarka paliwowo-energetyczna w latach 2004, 2005*, Warszawa, 2006, s. 235; Główny Urząd Statystyczny, *Gospodarka paliwowo-energetyczna w latach 2002, 2003*, Warszawa, 2004, s. 227; Główny Urząd Statystyczny, *Gospodarka paliwowo – energetyczna w latach 2001, 2002*, Warszawa, 2003, s. 227; Główny Urząd Statystyczny, *Produkcja wyrobów przemysłowych w 2012 r.* (http://www.stat.gov.pl/gus/5840_792_PLK_HTML.htm); Główny Urząd Statystyczny, *Produkcja wyrobów przemysłowych w 2004 r.* (http://www.stat.gov.pl/gus/5840_1076_PLK_HTML.htm); Główny Urząd Statystyczny, *Produkcja wyrobów przemysłowych w 2003 r.* (http://www.stat.gov.pl/gus/5840_1076_PLK_HTML.htm)

Tab. 3. Produkcja oleju napędowego w mln t na świecie

Wyszczególnienie	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Świat	1078,2	1041,8	1039,8	.	1123,2	1162,1	1179,9	1193,9	1238,8

Źródło: Główny Urząd Statystyczny, *Rocznik Statystyki Międzynarodowej 2012*, Warszawa, 2012, s. 423; Tamże 2009, Warszawa, 2010, s. 423; Tamże 2006, Warszawa, 2007, s. 418.

Transport intensywnie korzysta z paliw tradycyjnych takich jak: olej napędowy czy benzyna. Systematyczne ich wykorzystanie jest widoczne na przykładzie Polski. Najwyższy wzrost zużycia energii końcowej do 2020 r. (tab. 4) przypadnie sektorom transportu (31,7%), usług (31,3%). Tak widoczny wzrost przewidywany jest także w kolejnych latach, podczas gdy w innych sektorach jest on mniej znaczący. Można przypuszczać, że rosnące zużycie energii w sektorze transportu będzie dotyczyło paliw ciekłych, natomiast w sektorze usług – przeważnie energii elektrycznej.

Tab. 4. Zapotrzebowanie na energię finalną w podziale na sektory gospodarki [Mtoe]

Sektory	2006	2010	2015	2020	2025	2030
Przemysł	20,9	18,2	19,0	20,9	23,0	24,0
<i>Transport</i>	14,2	15,5	16,5	18,7	21,2	23,3
Rolnictwo	4,4	5,1	4,9	5,0	4,5	4,2
Usługi	6,7	6,6	7,7	8,8	10,7	12,8
Gosp. domowe	19,3	19,0	19,1	19,4	19,9	20,1
RAZEM	65,5	64,4	67,3	72,7	79,3	84,4
Procentowa zmiana zapotrzebowania na energię finalną w podziale na sektory gospodarki w odniesieniu do roku 2006						
Sektory	2010	2015	2020	2025	2030	
Przemysł	-12,92	-9,09	0	10,05	14,83	
<i>Transport</i>	9,15	16,2	31,69	49,3	64,08	
Rolnictwo	15,91	11,36	13,64	2,27	-4,55	
Usługi	-1,49	14,93	31,34	59,7	91,04	
Gosp. domowe	-1,55	-1,04	0,52	3,11	4,15	
RAZEM	-1,68	2,75	10,99	21,07	28,85	

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Ministerstwo Gospodarki, *Prognoza zapotrzebowania na paliwa i energię do 2030 roku*, Warszawa, 2009.

Przegląd danych (z tab. 5) wskazuje, że do 2030 r. spadnie zużycie węgla przeciwieństwie do innych nośników. W horyzoncie prognozy przewiduje się wzrost finalnego zużycia energii odnawialnej o 60%, energii elektrycznej o 55%, ciepła sieciowego o 50%, gazu o 29%, produktów naftowych o 27%. Tak znaczący wzrost zużycia energii odnawialnej wynika z wymagań Pakietu Energetyczno-Klimatycznego.

Tab. 5. Skala potrzeb na energię finalną w podziale na nośniki [Mtoe]

Nośniki	2006	2010	2015	2020	2025	2030
<i>Produkty naftowe</i>	21,9	22,4	23,1	24,3	26,3	27,9
Węgiel	12,3	10,9	10,1	10,3	10,4	10,5
Gaz ziemny	10,0	9,5	10,3	11,1	12,2	12,9
Energia odnawialna	4,2	4,6	5,0	5,9	6,2	6,7
Energia elektryczna	9,5	9,0	9,9	11,2	13,1	14,8
Ciepło sieciowe	7,0	7,4	8,2	9,1	10,0	10,5
Pozostałe paliwa	0,6	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2
RAZEM	65,5	64,4	67,3	72,7	79,3	84,4

Źródło: Ministerstwo Gospodarki, tamże..., Warszawa, 2009.

Polski sektor energetyczny znajduje się w fazie dokonywania potrzebnych zmian, umożliwiających stworzenie ekologicznej i korzystnej energetycznie struktury zaopatrzenia. Skalę potrzeb na energię finalną wytwarzaną ze źródeł odnawialnych przedstawiono odrębnie w tab. 6 w podziale na: energię elektryczną, ciepło, paliwa transportowe. W tych latach przewiduje się wzrost nośników energii (paliw ciekłych blisko dwudziestokrotnie, ciepła prawie dwukrotnie, energii elektrycznej niemal dziesięciokrotnie).

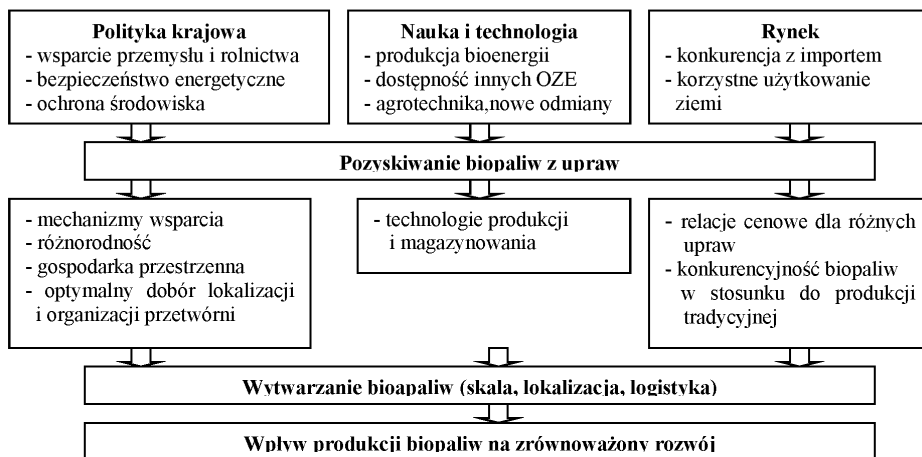
Tab. 6. Skala potrzeb na energię finalną brutto z OZE w podziale na rodzaje energii [ktoe]

	2006	2010	2015	2020	2025	2030
Energia elektryczna	370,6	715,0	1516,1	2686,6	3256,3	3396,3
<i>Biomasa stała</i>	159,2	298,5	503,2	892,3	953,0	994,9
<i>Biogaz</i>	13,8	31,4	140,7	344,5	555,6	592,6
<i>Wiatr</i>	22,0	174,0	631,9	1178,4	1470,0	1530,0
<i>Woda</i>	175,6	211,0	240,3	271,4	276,7	276,7
<i>Fotowoltaika</i>	0,0	0,0	0,0	0,1	1,1	2,1
Ciepło	4312,7	4481,7	5046,	6255,9	7048,7	7618,4
<i>Biomasa stała</i>	4249,8	4315,1	4595,7	5405,9	5870,8	6333,2
<i>Biogaz</i>	27,1	72,2	256,5	503,1	750,0	800,0
<i>Geotermia</i>	32,2	80,1	147,5	221,5	298,5	348,1
<i>Słoneczna</i>	3,6	14,2	46,7	125,4	129,4	137,1
Biopaliw transportowe	96,9	549,0	884,1	1444,1	1632,6	1881,9

	2006	2010	2015	2020	2025	2030
<i>Bioetanol cukro-skrobiowy</i>	61,1	150,7	247,6	425,2	443,0	490,1
<i>Biodiesel z rzepaku</i>	35,8	398,3	636,5	696,8	645,9	643,5
<i>Bioetanol II generacji</i>	0,0	0,0	0,0	210,0	240,0	250,0
<i>Biodiesel II generacji</i>	0,0	0,0	0,0	112,1	213,0	250,0
<i>Biowodór</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	90,8	248,3
Ogółem energia finalna brutto z OZE	4780	5746	7447	10387	11938	12897
Energia finalna brutto	61815	61316	63979	69203	75480	80551
% udziału energii odnawialnej	7,7	9,4	11,6	15,0	15,8	16,0

Źródło: Ministerstwo Gospodarki, tenże..., Warszawa, 2009.

Warto przyjrzeć się czynnikom (polityka krajowa, nauka i technologia, rynek) kształtującym zapotrzebowanie na paliwa alternatywne, które wpływają na: produkcję bioenergii, import biopaliw, bezpieczeństwo energetyczne.



Rys. 1. Czynniki kształtujące zapotrzebowanie na biopaliwa

Źródło: O. A. Oryńcz, *Produkcja biopaliw ciekłych, jako źródła energii dla transportu*, [W:] Energetyka i ekologia, nr 8, 2012, s. 471–475.

Z paliw tradycyjnych największą emisję ditlenku węgla powoduje węgiel kamienny, mniejszą ropa naftowa czy gaz ziemny, natomiast np. biomasa roślinna,

wprawdzie w chwili spalania powoduje emisję CO₂, ale jest to ta ilość, która została pobrana z atmosfery przez roślinę w trakcie jej życia, czyli bilans globalnie równoważony, choć okresy pochłaniania i emisji są przesunięte w czasie, co powoduje chwilowe niezrównoważenie zależne od typu biomasy. Pokazany w tab. 4 wzrost zapotrzebowania transportu na energię wskazuje także na perspektywę wzrostu emisji CO₂ pochodzącej z tego źródła. Wkład Unii Europejskiej w światową emisję ditlenku węgla spowodowany przez środki transportu przedstawiono w tab. 7.

Tab. 7. Emisja CO₂ (*) z sektora transportu krajów UE w latach 1990–2007 r. [mln ton]

	Lotnictwo ogółem	Lotnictwo krajowe (**)	Lotnictwo międzynarod.	Transport drogowy	Transport kolejowy	Żegluga ogółem	Żegluga krajowa (**)	Żegluga międzynarod.	Inne gałęzie	Ogółem transport	Emisja całkowita (***)
1990	83	17	66	704	14	129	21	109	11,3	942	4574
1995	100	17	83	767	10	127	19	108	9,2	1014	4342
2000	135	22	113	842	9	150	18	131	9,3	1145	4350
2005	150	22	128	895	8	183	21	162	9,7	1245	4521
2007	160	22	137	905	8	195	22	174	8,7	1277	4498

* wyłącznie z tankowaniem środków transportowych opuszczających obszar UE

** bez tankowania samolotów i statków opuszczających obszar UE

*** wyłącznie z tankowaniem środków transportowych opuszczających obszar UE

Źródło: European Commission, *EU energy and transport in figures*. Statistical Pocketbook 2010.

Analiza danych zamieszczonych powyżej wskazuje, że prawie we wszystkich sektorach transportu obserwuje się wzrost emisji, jednak dynamika wzrostu ma tendencję malejącą. Liczby te mogą wskazywać, że konstruktorzy środków transportu skutecznie wprowadzają rozwiązania ograniczające emisję. Tym niemniej wzrost liczby pojazdów, co jest pokazane w tab. 8 i tab. 9 skłania do poszukiwań w dziedzinie redukcji emisji CO₂.

Tab. 8. Samochody z napędem benzynowym w Polsce*

	Samochody osobowe			Samochody ciężarowe		Ciągniki siodłowe	Autobusy	Sam. specjalne
	razem	w tym o pojemności silnika		razem	w tym o ładowności 1500 i więcej			
		do 1399 cm ³	1400–1999 cm ³					
Benzyna								
Polska 2009	10396487	6506171	3541986	724305	31211	1852	4496	26139
Polska 2010	10516590	6581249	3583310	724920	30569	1766	4380	26283

* wg centralnej ewidencji pojazdów prowadzonej przez Ministerstwo Spraw Wewnętrznych i Administracji

Źródło: opracowanie na własne na podstawie GUS, *Transport – wyniki działalności w 2010 r.*, Warszawa, 2011.

Tab. 9. Samochody z silnikami na olej napędowy w Polsce*

	Samochody osobowe			Samochody ciężarowe		Ciągniki siodłowe	Autobusy	Sam. specjalne
	razem	w tym o pojemności silnika		razem	w tym o ładowności 1500 i więcej			
		do 1399 cm ³	1400–1999 cm ³					
Olej napędowy								
Polska 2009	3370879	142360	2613745	1613808	521879	193944	86535	94751
Polska 2010	3871105	164870	3038905	1785121	539185	207643	88313	102825

* wg centralnej ewidencji pojazdów prowadzonej przez Ministerstwo Spraw Wewnętrznych i Administracji

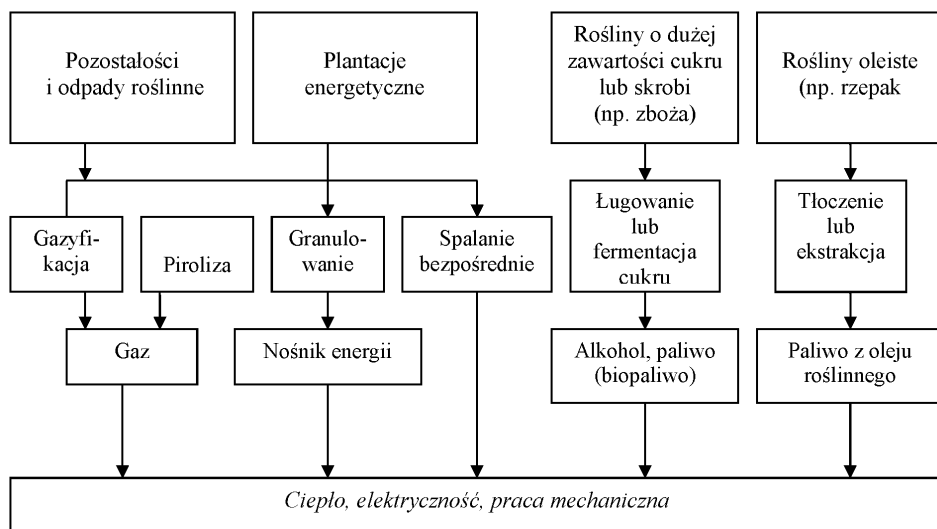
Źródło: opracowanie na własne na podstawie GUS, *Transport – wyniki działalności w 2010 r.*, Warszawa, 2011.

1.3. Potencjalne biologiczne surowce do produkcji biopaliw płynnych

Zastosowanie biomasy do produkcji energii należy rozpatrywać w wielu wymiarach. W wyniku przemian procesów termicznych, biologicznych i mechanicznych dokonywane są przekształcenia energetyczne biomasy, w wyniku czego uzyskuje się energię cieplną, elektryczną i biopaliwa. Zamiana biomasy na nośniki energii może odbywać się metodami: chemicznymi, fizycznymi i biochemicznymi. Produkcję energii z surowców roślinnych zawarto na rys. 2. Biomasy można używać na cele energetyczne:

- podczas bezpośredniego spalania biopaliw stałych (np. słoma, drewno, osady ściekowe),
- przetwarzania na paliwa płynne (np. estry oleju rzepakowego, alkohol),
- przetwarzania na paliwa gazowe (np. biogaz rolniczy, biogaz z oczyszczalni ścieków, gaz wysypiskowy),

która to energia jest pozyskiwana w wyniku procesów spalania, gazyfikacji syntetycznej czy fermentacji alkoholowej.



Rys. 2. Energia z surowców roślinnych

Źródło: A. Chochowski, F. Krawiec, *Zarządzanie w energetyce: koncepcje, zasoby, strategie, struktury, procesy i technologie energetyki odnawialnej*, Warszawa, Difin, 2008, s. 338.

Możliwość wykorzystania danego surowca na cele spożywcze lub niespożywcze uzależniona jest od jego ceny, dostępności oraz jakości. Do potencjalnych surowców stosowanych w produkcji biopaliw płynnych zalicza się m.in. grupę roślin oleistych, które gromadzą co najmniej od 15–20% tłuszczu w nasionach lub częściach owoców. Od 5–6% światowej produkcji roślin oleistych używa się jako materiał siewny lub pasza dla zwierząt, ok. 8% przeznaczają się do konsumpcji przez ludzi, natomiast pozostałe 86% trafia do przerobu na oleje i śrutę.²⁰ Poniższa tab. 10 przedstawia główne rodzaje tłuszczów.

Tab. 10. Źródła tłuszczów na świecie

Tłuszcze	Rodzaje
Jadalne	sojowy, słonecznikowy, jęczmienny, rzepakowy, palmowy, lniany, bawełniany, arachidowy, owsiany, ryżowy, z sorgo, pszeniczny, kukurydziany, sezamowy, sojowy, dyniowy, konopny, z orzechów laskowych i włoskich, z pestek winogron, oliwa z oliwek itd.
Niejadalne	migdałowy, palmowy babassu, zaślazowy, andiroba, musztardowy, rycynowy, jatrofowy, jojoba, wawrzynowy, mahua, figowy, łososiowy
Zwierzęce	smalec, łój, tłuszcz drobiowy i rybny
Inne oleje	pozyskiwane z bakterii, alg, grzybów

Źródło: opracowanie własne na podstawie B. Igliński, R. Buczkowski, M. Cichosz, *Technologie bioenergetyczne*, Toruń, Wydawnictwo Naukowe Mikołaja Kopernika, 2009, s. 218–224.

Oleje roślinne stanowią grupę potencjalnych surowców roślinnych do produkcji paliw płynnych. Najwięcej na świecie wytwarza się oleju sojowego (ok. 20 mln ton), palmowego (ok. 14 mln ton), w następnej kolejności obok oleju słonecznikowego znajduje się olej rzepakowy. Stosuje się również mniej znane rośliny oleiste, ale użycie ich w produkcji waha się od 2–3% (np. gorczyca biała i sarepska, rzodkiew oleista, lnianka, dynia oleista, katan abisyński, len oleisty, krokosz).²¹ Pomimo tego, że w skład roślin oleistych, według statystyk FAO, wchodzi ponad 20 gatunków, to rynek został zdominowany głównie przez cztery najważniejsze rośliny: rzepak, słonecznik, soję i palmę oleistą, które są odpowiedzialne za wzrost obrotów olejami roślinnymi na światowym rynku (np. udział olejów z tych roślin wzrósł z 40% w 1961 r. do 76% w 2005 r.).²²

Głównym kierunkiem niespożywczego wykorzystania olejów roślinnych jest produkcja biodiesla. Produkcja tego biopaliwa na świecie rozwija się w oparciu o surowiec szeroko dostępny i spełniający wymagania jakościowe. W krajach europejskich, które zajmują czołowe miejsce w światowej produkcji rzepaku,

²⁰ P. Boczar, *Niektóre aspekty światowego rynku olejów roślinnych w latach 1961–2005*, [W:] Stowarzyszenie Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu. Roczniki Naukowe, nr 4, 2007, s. 20–23.

²¹ A. Chochołowski, F. Krawiec, tenże..., s. 346–354.

²² P. Boczar, tenże..., s. 20–23.

używa się przeważnie oleju rzepakowego, do produkcji biodiesla, w Stanach Zjednoczonych, Argentynie i Brazylii oleju sojowego, a w Indonezji i Malezji oleju palmowego.²³

Paliwa alkoholowe i oleje roślinne były pierwszymi produktami stosowanymi jako paliwa do silników trakcyjnych, które stopniowo były wypierane przez tanią wówczas ropę naftową.²⁴ Na świecie produkuje się dużo różnych paliw płynnych, które są wytwarzane z potencjalnych roślin oleistych. Jak wynika z zestawienia (tab. 11) istnieje szeroka gama surowców niezbędnych do procesu konwersji w biopaliwa energetyczne.

Tab. 11. Źródła biopaliw ciekłych i ich przeznaczenie

Biopaliwo	Roślina	Proces konwersji	Przeznaczenie
Bietanol	zboża, pseudozboża, ziemniaki, topinambur	hydroliza, fermentacja	dodatek do benzyny
	buraki cukrowe, słodkie sorgo, trzcina cukrowa	fermentacja	dodatek do benzyny
	uprawy energetyczne, rośliny trawiaste, słoma, miscantus	obróbka wstępna, hydroliza, fermentacja	dodatek do benzyny
Biometanol	uprawy energetyczne, miscantus	gazyfikacja lub synteza metanolu	źródło wodoru, ogniwa paliwowe
Olej roślinny	rzepak, soja, słonecznik	tłoczenie	dodatek do ON lub samoistne biopaliwo do specjalnych silników
Biopaliwo rzepakowe	rzepak, soja, słonecznik	estryfikacja	dodatek do ON lub samoistne paliwo
Bioolej	uprawy energetyczne, miscantus	piroliza	substytut oleju napędowego lub benzyny

Źródło: Na podstawie: A. Chochowski, F. Krawiec, tamże..., s. 347; M. Jasiulewicz, *Potencjał biomasy w Polsce*, Koszalin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2010, s. 67; E. Rosiak, *Produkcja roślin oleistych, Polska wieś w Europie*, s. 7.

Warto zaznaczyć, że podział biopaliw na generacje odwołuje się do rodzajów surowców. Do produkcji biopaliw pierwszej generacji wykorzystywane są surowce rolnicze tj. rzepak, słonecznik, soja, zboża, buraki i trzcina cukrowa.

²³ A. Demirbas, *Biodiesel production via non-catalytic SCF method and biodiesel fuel characteristics*, [W:] *Energy Conversion and Management*, nr 27, 2006, p. 2271–2282; P. Boczar, *Czynniki decydujące o konkurencyjności produkcji wybranych olejów roślinnych na świecie*, [W:] *Zeszyty Naukowe SGGW. Problemy Rolnictwa Światowego*, tom 12, nr 4, 2010, s. 5–13.

²⁴ B. Igliński, R. Buczkowski, M. Cichosz, tamże..., s. 196.

Druga generacja biopaliw pozyskiwana jest z biomasy lignocelulozowej, niejadalnych olejów roślinnych, odpadów i produktów ubocznych pochodzących z przetwórstwa (np. mięsnego, rybnego).²⁵ Obecnie znaczną przydatność do produkcji biopaliw upatruje się w uprawie *Jatropha curacas*. Zawartość oleju w nasionach tego egzotycznego drzewa wynosi 30–40%. Przyjmując sprawność tłoczenia na zimno na poziomie 91%, można pozyskać z 1 ha ok. 2,2–2,7 t oleju. Inną rośliną będącą źródłem oleju do produkcji biopaliw jest kauczukowiec (*hevea aubl.*), którego wydajność z 1 ha planacji wynosi 200–300 kg owoców rocznie, gdzie nasiona stanowią 40–50% ich masy i zawierają 22% oleju niejadalnego. Do produkcji biodiesla, w regionach półpustynnych, rozpoczęto uprawę rącznika (*ricinus communis L.*), którego wydajność nasion na tych terenach wynosi ok. 1,5 t/ha.²⁶ Podobne badania prowadzone są nad wykorzystaniem oleju z karanji (*Pongamia pinata*). Wydajność nasion z 1 ha uprawy waha się od 900 do 9000 kg, gdzie ok. 25% tej masy stanowi olej.²⁷

Przewiduje się, że do otrzymywania biopaliw trzeciej generacji stosowane będą m.in. glony i wodorosty. Znaczne zainteresowanie wzbudza również stosowanie tanich surowców wtórnych. Najczęściej stosowanymi surowcami tłuszczowymi są oleje posmażalnicze, odpady zwierzęce (smalec, lój), natłuski (smary) oraz sopsztoki (odpady po rafinacji olejów jadalnych).²⁸ W literaturze przedmiotu wiele prac poświęcono pozyskiwaniu biodiesla z ww. surowców. Zbadano sposób otrzymywania estrów metylowych, spełniających normy EN 14214, z różną zawartością tri- i diacylogliceroli, zawierających reszty kwasów oleinowego i linolowego, prowadzonych w warunkach katalizy zasadowej.²⁹ Na podstawie podobnych badań porównano biodiesle otrzymane z oleju sojowego, łoju i tłuszczu posmażalniczego metodą transestryfikacji i amidacji. Celem pozyskania FAME, w innej pracy zastosowano katalizator kwasowy potrzebny w syntezie estrów z surowca posmażalniczego zawierającego wolne kwasy tłuszczowe. Oceniono również przydatność sopsztek, produktów ubocznych będących efektem rafinacji alkaicznej olejów jadalnych.³⁰ Więcej informacji

²⁵ B. Burczyk, *Biomasa – surowiec do syntez chemicznych i produkcji paliw*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011, s. 201–205; E. Klimiuk, M. Pawłowska, T. Pokój, *Biopaliwa – technologie dla zrównoważonego rozwoju*, Warszawa, PWN, 2012, s. 4–5.

²⁶ E. Klimiuk, M. Pawłowska, T. Pokój, tenże..., s. 38–39.

²⁷ S.K. Karmee, A. Chadha, *Preparation of biodiesel from crude oil of Pongamia pinnata*, [W:] *Bioresour Technology*, nr 96, 2005, p. 1425–1429.

²⁸ B. Burczyk, tenże..., s. 201–205; E. Klimiuk, M. Pawłowska, T. Pokój, tenże..., s. 4–5.

²⁹ M. Çetinkaya, F. Karaosmanoğlu, *Optimization of Base – Catalyzed Transesterification Reaction of Used Cooking Oil*, [W:] *Energy & Fuels*, nr 18, 2004, p. 1888–1895.

³⁰ R. Alcantara, J. Amores, L. Canoira, E. Fidalgo, M.J. Franco, A. Navarro, *Catalytic production of biodiesel from soy-bean oil, used frying oil and tallow*, [W:] *Biomass & Bioenergy*, nr 18, 2000, p. 515–527; S. Zheng, M. Kates, M.A. Dubé, D.D. McLean, *Acid-catalyzed production of biodiesel from waste frying oil*, [W:] *Biomass & Bioenergy*, nr 30, 2006, p. 267–272; H. Piñkowska, *Techniczne aspekty produkcji biodiesla – nowe kierunki badań*, [W:] *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu. Technologia* 13, nr 30, 2008, s. 152–168.

dotyczących produkcji biodiesla na bazie surowców wtórnych i jego konkurencyjności z olejem napędowym można znaleźć w pracach naukowych.³¹

1.3.1. Uwarunkowania produkcji biopaliwa rzepakowego

W naszym kraju istnieją odpowiednie warunki klimatyczne i glebowe do rozwoju produkcji rzepaku i rzepiku. Pomiędzy rzepakiem, a spokrewnionym z nim rzepikiem występuje znaczne podobieństwo cech użytkowych i morfologicznych. Obydwa gatunki występują w formie ozimej i jarej. Jednak z uwagi na plonowanie i jakość oleju roślinnego większe znaczenie ma rzepak. Aktualnie nie uprawia się rzepiku z przeznaczeniem na nasiona, chociaż statystyki GUS podają łączną powierzchnię uprawy tego gatunku z rzepakiem. Podobnie dzieje się z plonami nasion, podawanymi jako średnia z obydwu gatunków, co jest kontynuacją dotychczasowej praktyki.

Obecnie w Polsce dominuje w uprawie forma ozima rzepaku ze względu na wyższy potencjał plonowania w porównaniu z formą jarą oraz innymi jarymi gatunkami roślin oleistych. Z tego względu rzepak ozimy jest gatunkiem podstawowym i wiodącym w dostarczaniu nasion przeznaczonych na olej w dużych zakładach tłuszczowych i małych olejarniach.³² Współcześnie zachodzi potrzeba systematycznego zwiększania powierzchni uprawy rzepaku, w ślad za wymogami *Dyrektywy UE 2003/30/WE* oraz nowej *Dyrektywy 2009/28/WE*. Sprawia to, że biopaliwa ciekłe odgrywają coraz większą rolę w polityce energetycznej. Poniżej przedstawiono propozycję NCW na lata 2014–2020 według *Dyrektywy 2009/28/WE*.³³

Tab. 12. Stawki udziału biokomponentów w rynku paliw transportowych

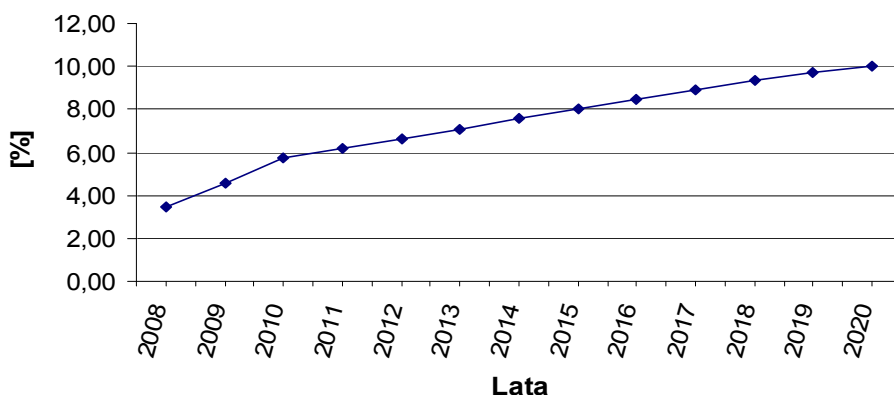
Lata	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
NCW % energ.	3,45	4,60	5,75	6,20	6,65	7,10	7,55	8,00	8,45	8,90	9,35	9,75	10,00

Źródło: Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 15 czerwca 2007 r. w sprawie *Narodowych Celów Wskaźnikowych na lata 2008–2013*, Dz. U. nr 110, poz. 757; Minister Gospodarki, *Krajowy Plan Działania w zakresie energii ze źródeł odnawialnych*, Warszawa, 2010 (projekt).

³¹ H. Pińkowska, tamże..., s. 152–168; M.G. Kulkarni, A.K. Dalai, *Waste Cooking Oil – An Economical Source for Biodiesel: A Review*, [W:] *Industrial & Engineering Chemistry Research*, nr 45, 2006, p. 2901–2913; Y. Zhang, MA. Dubé, DD. McLean, M. Kates, *Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensitivity analysis*, [W:] *Bioresour Technology*, nr 90, 2003, p. 229–240.

³² T. Juliszewski, T. Zając, tenże..., s.9–16.

³³ A. Kupeczyk, D. Ruciński, *Wykorzystanie biopaliw transportowych w Polsce na tle UE. Narodowy Cel Wskaźnikowy – stan obecny i perspektywy*, [W:] *Energetyka*, nr 12, 2008.



Rys. 3. Perspektywy udziału biokomponentów w rynku paliw transportowych do 2020 r.

Źródło: Na podstawie: Rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 15 czerwca 2007 r. w sprawie *Narodowych Celów Wskaźnikowych na lata 2008–2013*, Dz. U. nr 110, poz. 757.

W latach 2005–2013 zapotrzebowanie na olej rzepakowy z przeznaczeniem na cele spożywcze wzrasta z 400 tys. ton w 2005 r. do 660 tys. ton w 2013 r. (tab. 13). Aby jednocześnie zaspokoić warunek produkcji odpowiedniej ilości estrów (tab. 14), przy użyciu rzepaku do celów konsumpcyjnych, konieczne jest zwiększanie jego produkcji na cele energetyczne (tab. 15).

Potencjał produkcyjny rolnictwa Polski daje możliwości na pełne zaspokojenie potrzeb żywnościowych ludności w kraju, a także może być poważnym producentem OZE z biomasy.³⁴

Szczególne zainteresowanie rzepakiem związane jest z możliwością zastosowania oleju rzepakowego do produkcji odnawialnego paliwa napędowego.

Tab. 13. Skala zapotrzebowania na olej rzepakowy zużywany na cele spożywcze w okresie 2005–2013

Wyszczególnienie	Jedn. miary	2005	2007	2010	2013
Olej rzepakowy	tys. ton	400	400	520	660

Źródło: E. Rosiak, *Sektor olejarski – perspektywy rozwoju do 2013 roku*, [W:] Biuletyn informacyjny ARR, nr11, 2006, s. 30–37.

³⁴ M. Jasiulewicz, *Potencjał biomasy w Polsce*, Koszalin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2010, s. 63.

Tab. 14. Skala zapotrzebowania na olej rzepakowy zużywany na cele energetyczne w okresie 2005–2013*

Wyszczególnienie	Jedn. miary	2005	2007	2010	2013
Zużycie ON**	tys. ton	7110	7830	8980	10300
	tys. m ³	8464	9266	10627	12262
Udział estrów w ON***	%	2,12	3,71	6,10	6,10
Zapotrzebowanie na estry	tys. m ³	179	344	648	750
	tys. ton	158	303	570	660
Zapotrzebowanie na olej rzepakowy	tys. ton	158	303	570	660

* Zgodnie z zaleceniami Dyrektywy 2003/30/WE

** Prognoza ORLEN dla IERiGŻ-PIB

*** Udział objętościowy

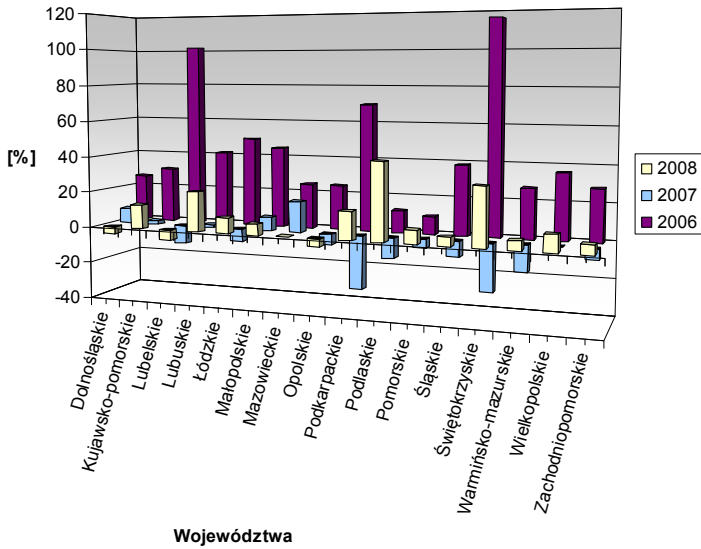
Źródło: E. Rosiak, tenże..., s. 30–37.

Tab. 15. Skala powierzchni uprawy, plonów i zbiorów rzepaku w okresie 2005–2013

Wyszczególnienie	Jedn. miary	2005	2007	2010	2013
Powierzchnia uprawy:	tys. ha	545	680	975	1052
• na cele spożywcze	tys. ha	418	400	464	483
• na cele energetyczne	tys. ha	127	304	511	569
Plon	t/ha	2,6	2,5	2,8	2,9
Zbiory:	mln ton	1,45	1,70	2,73	3,05
• na cele spożywcze	mln ton	1,00	1,00	1,30	1,40
• na cele energetyczne	mln ton	0,33	0,76	1,43	1,65

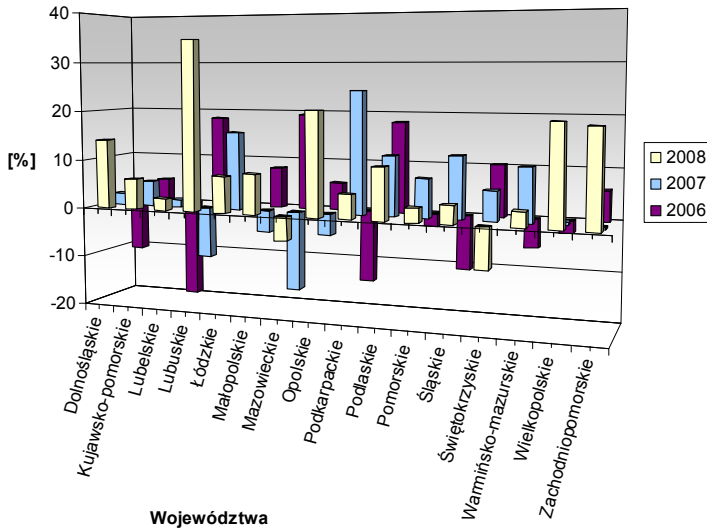
Źródło: E. Rosiak, tamże..., s. 30–37.

Produkcję rzepaku ozimego w liczbach przedstawiono na rys. 4–6.



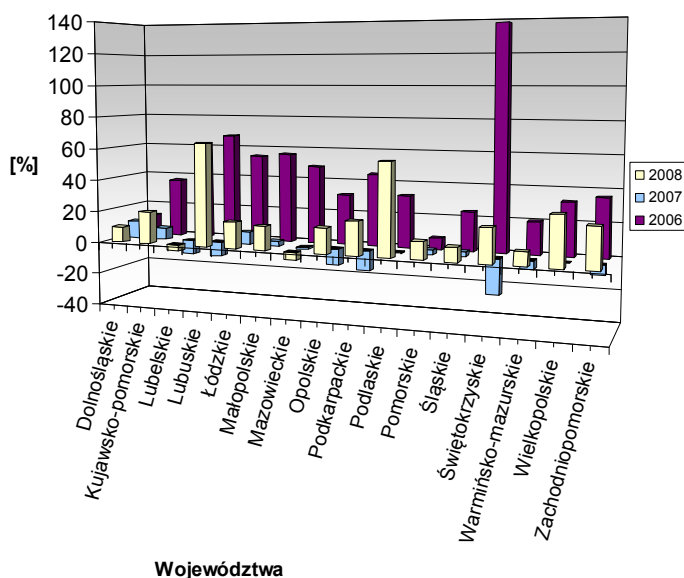
Rys. 4. Dynamika powierzchni zasiewów rzepaku i rzepiku ozimego w Polsce

Źródło: opracowanie własne na podstawie GUS, Warszawa, 2008, 2009, 2010.



Rys. 5. Dynamika plonów rzepaku i rzepiku ozimego w Polsce

Źródło: opracowanie własne na podstawie GUS, Warszawa, 2008, 2009, 2010.



Rys. 6. Dynamika zbiorów rzepaku i rzepiku ozimego w Polsce

Źródło: opracowanie własne na podstawie GUS, Warszawa, 2008, 2009, 2010.

Analiza powierzchni zasiewów rzepaku i rzepiku ozimego w latach 2006–2008 wskazuje na wzrost dynamiki, z wyjątkiem 2007 r., w którym nastąpił spadek w większości województw. Przegląd plonów z 1 ha w tych latach pozwala zauważyć, że dynamika w 2006 r. w niektórych województwach była niższa, natomiast znaczący wzrost powierzchni uprawy, pozwolił utrzymać wysoki poziom zbiorów. Można zauważyć, że w 2007 r. niska powierzchnia zasiewów przyczyniła się do niższych zbiorów, pomimo odnotowanej tendencji wzrostowej plonów z 1 ha w przeważającej części województw. Z kolei rok 2008 wykazał tendencję wzrostową plonów w pewnej liczbie województw proporcjonalną do powierzchni zasiewów i zbiorów.³⁵

Obecnie dąży się do dalszego zwiększania wykorzystania nasion rzepaku z przeznaczeniem na biopaliwa (tab. 16). Potencjał produkcji estrów metylowych na bazie rzepaku jest w Polsce duży, ale różnicowany pod względem regionalnym. Możliwości produkcji surowców potrzebnych do produkcji estrów metylowych oleju rzepakowego (biodiesla) w Polsce są wystarczające do spełnienia wymogów UE, tak pod względem powierzchni upraw, jak i wielkości produkcji rzepaku.³⁶

³⁵ O. A. Oryńcz, *Perspektywy rozwoju produkcji biopaliw ciekłych w indywidualnych gospodarstwach rolnych*, [W:] Zarządzanie i Finanse, nr 10/2/1, 2012, s. 181–192.

³⁶ M. Jasiulewicz, *Potencjał biomasy w Polsce*, Koszalin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2010, s. 73–80.

Tab. 16. Krajowa prognoza zapotrzebowania na rzepak do produkcji biodiesla w latach 2010–2020

Lata	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Popyt na rzepak na cele energetyczne w tys. t	1824	2039	2376	2634	2945	3178	3461	3714	4021	4297	4495
Potrzeby obszarowe uprawy rzepaku w tys. ha	651	728	848	878	982	1059	1154	1198	1297	1302	1362

Źródło: opracowanie własne na podstawie Ministra Gospodarki, 2010, *Krajowy Plan Działania w zakresie energii ze źródeł odnawialnych*, Warszawa.

W poprzednich latach rzepak uprawiano głównie do celów spożywczych. Przemysł rafineryjny rozpoczął swoją działalność w Polsce dopiero od kilku lat. Należy podkreślić, że ostatnie lata to dynamiczny wzrost produkcji rzepaku, jak i również wzrost produkcji estrów. Można tylko żałować, że większość tych estrów trafiła na eksport (tab. 17).

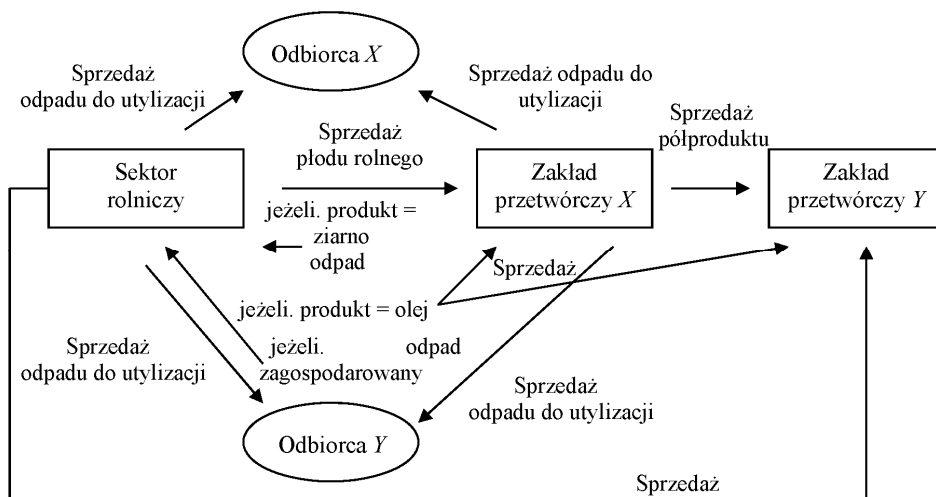
Tab. 17. Bilans biodiesla w Mg w Polsce

Wyszczególnienie	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Pozyskanie	64336	89126	47447	263729	364832	379802	363894
Import (+)	-	142	-	94034	151535	397689	495634
Eksport (-)	48599	51528	19440	-	8343	13060	37441
Zmiana zapasów	1344	1252	-107	-7408	2392	-3468	1365
Zużycie krajowe ogółem z tego:	17081	39022	27900	350355	510416	760963	823452
elektrownie zawodowe	-	-	-	-	825	240	599
mieszalnie produktów naftowych	14652	32516	25307	344391	421837	529912	583853
końcowe (finalne) w transporcie	2429	6506	2593	5964	87754	230811	239000

(-) – zjawisko nie wystąpiło

Źródło: Główny Urząd Statystyczny, *Energia ze źródeł odnawialnych w 2011 r.*, Warszawa, 2012, s. 53; Główny Urząd Statystyczny, *Energia ze źródeł odnawialnych w 2006 r.*, Warszawa, 2007, s. 29.

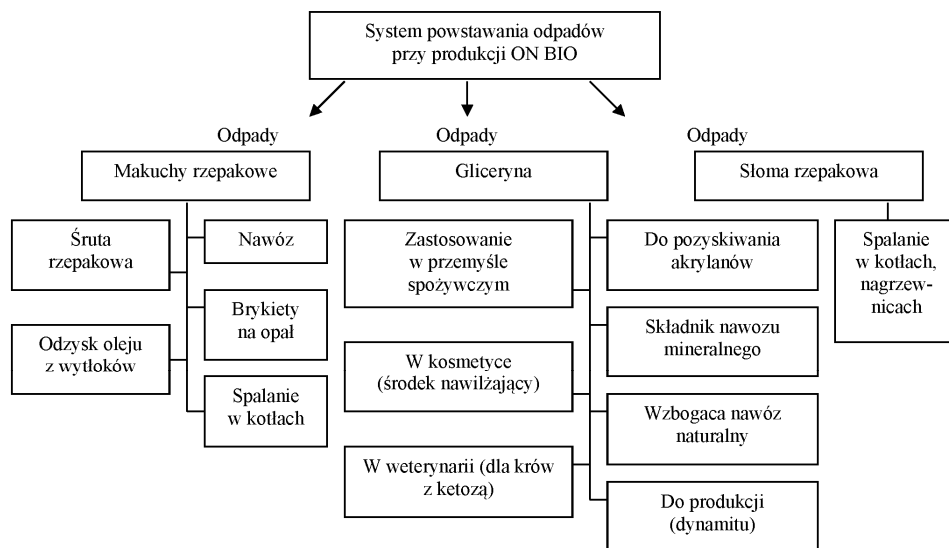
W czasie produkcji biopaliwa rzepakowego powstają produkty uboczne, których zagospodarowanie może wpływać na zwiększenie lub zmniejszenie efektywności energetycznej wytwarzania paliwa silnikowego. Wzrost ilości tych odpadów zmusza do poszukiwań alternatywnych metod ich wykorzystania. System wytwarzania biopaliw, ze względu na wykorzystywanie w nim surowca rolniczego, składa się z dwóch podsystemów, rolnego i przetwórczego o zróżnicowanej wydajności i technologii produkcji. W każdym z nich zachodzą różne elementarne procesy technologiczne,³⁷ w których zachodzi konwersja masy i energii. Technologie te mogą być realizowane przez różnych przetwórców. Relacje między przetwórcami mogą być łańcuchowe, a liczba wariantów relacji może być duża (rys. 7).



Źródło: opracowanie własne.

43

Przykładowo małe instalacje korzystają z tańszego wyposażenia technicznego, i prostszych wariantów dystrybucji i logistyki, gdyż produkty przerobu stosuje się przeważnie w najbliższym otoczeniu, co pozwala na obniżenie kosztów produkcji. Zaś duże instalacje na skalę przemysłową korzystają z transportu na większe odległości, po wyższych kosztach, ale mogą mieć sprawniejszy system logistyki i organizacji. Właściwe zagospodarowanie półproduktów i odpadów (rys. 8) może decydować o sprawności energetycznej i materialnej.

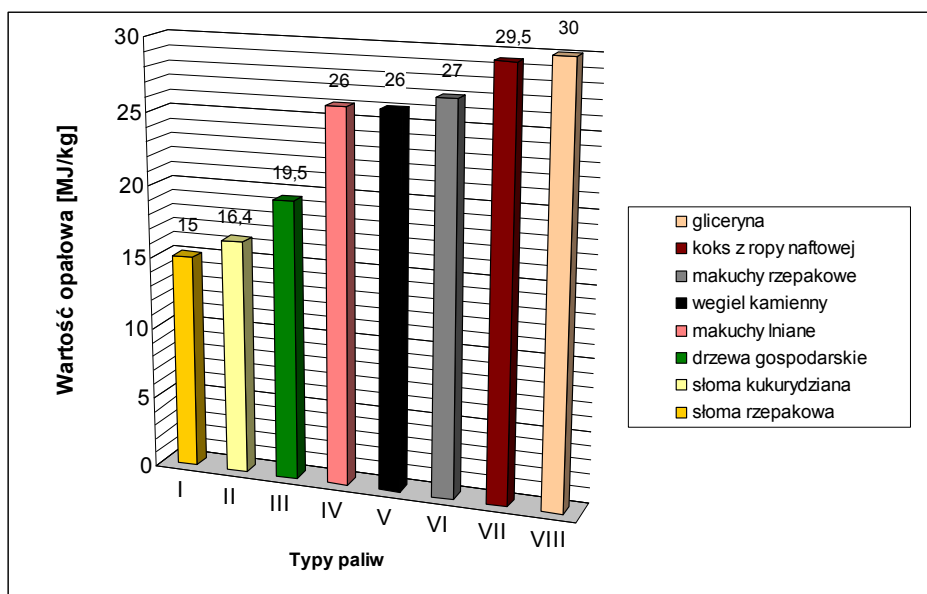


Rys. 8. Sposoby zagospodarowania odpadów

Źródło: opracowanie własne.

Rys. 9 pokazuje, że wartość opałowa odpadów biomasy może mieć istotne znaczenie dla bilansu energetycznego systemu produkcji biopaliw. Wielkość zakładu przetwórczego decyduje, o niezbędnym dla zaspokojenia ciągłości dostaw surowca, areale współpracujących gospodarstw rolnych. Wpływa także na charakter współpracujących plantacji. W przypadku stosunkowo małych instalacji można wyobrazić sobie ulokowanie całej plantacji na spójnym powierzchniowo obszarze plantacji. Duże zapotrzebowanie na surowiec wymaga współpracy z większą liczbą rozproszonych plantacji. Każdy z tych przypadków charakteryzuje się zróżnicowanym zapotrzebowaniem na czynniki produkcji, inną logistyką, itp. Wszystkie te czynniki powodują, że sprawność systemów produkcyjnych złożonych z podsystemów rolnego i przetwórczego może zależeć od szeregu czynników, a właściwy ich dobór powinien doprowadzić do optymalizacji systemu i zachodzących w nim procesów pod względem zarówno wydaj-

ności masy biopaliwa, sposobu zagospodarowania odpadów, jak i sprawności energetycznej. Można również wykazać zależność pomiędzy sposobem zagospodarowania odpadów a wydajnością energetyczną systemu. Współdziałanie podsystemów rolnego i przetwórczego może również wymagać tworzenia buforów magazynowych dla składowania półproduktów.



Rys. 9. Porównanie wartości opałowych niektórych typów odpadów biomasy

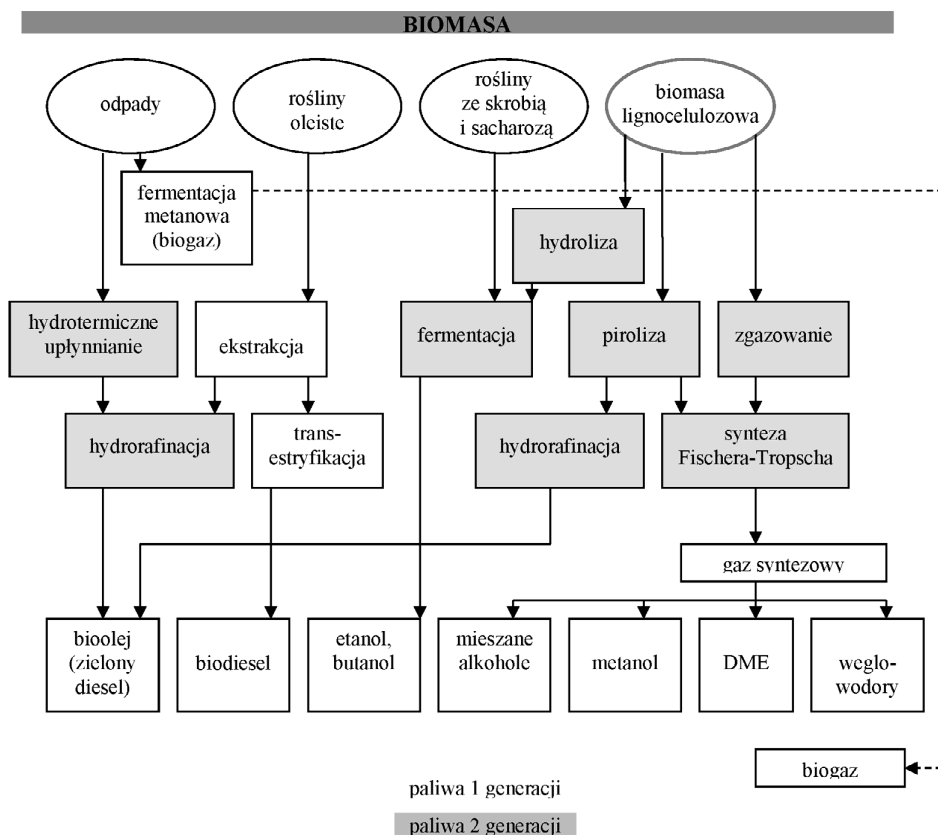
Źródło: opracowanie własne na podstawie *Biomass Energy Data Book*, 2011, s. 1; B. Cieślowski, T. Juliszewski, B. Łapczyńska-Kordon, *Utylizacja na cele energetyczne produktów ubocznych technologii biopaliwowej*, [W:] *Inżynieria Rolnicza*, nr 12, 2006, s. 19.

Istnieją również inne zastosowania oleju rzepakowego na cele niespożywcze, jednak tylko produkcja biopaliw jest w stanie zużytkować duże ilości oleju rzepakowego. Nadwyżkę oleju rzepakowego można przeznaczyć do wytwarzania innych produktów. Olej nadaje się zarówno do przerobu na środki powierzchniowo czynne (surfaktanty), oleje i smary rozkładalne biologicznie, a po nieznacznej przeróbce chemicznej do produkcji lakierów, farb, nietoksycznych rozpuszczalników czy ekologicznych wykładzin podłogowych.³⁸

³⁸ Instytut Ochrony Roślin, *Integrowana produkcja rzepaku ozimego i jarego*, Poznań, 2008, s. 92–96.

1.4. Typy biopaliw i dostępne technologie do ich produkcji

Dotychczasowe badania nad technologiami przetwarzania biomasy na biopaliwa wskazują na znaczną różnorodność dostępnych technologii, rys. 10.



Rys. 10. Podział biopaliw w zależności od rodzaju surowca i technologii wytwarzania

Źródło: E. Klimiuk, M. Pawłowska, T. Pokój, *Biopaliwa – technologie dla zrównoważonego rozwoju*, Warszawa, PWN, 2012, s. 4–6.

W chwili obecnej istnieje kilka procesów technologicznych, które mogą być zastosowane w praktyce do produkcji biopaliw. Analiza literatury wskazuje, że stosowane są głównie metody transestryfikacji, Fischera Tropscha i coraz częściej enzymatyczne.³⁹

³⁹ B. Caylak, F. Vardar Sukan, *Comparison of Different Production Processes for Bioethanol*, [W:] Turkish Journal of Chemistry, nr 22, 1998, p. 351–359; Cover story, *Microbiome mining*, [W:] Chemical & Engineering News, vol. 90, no. 49, december 3, 2012, p. 13–16; Ю.В. Довгань, *Стан та перспективи розвитку ринку продукції підприємств олійно-жирового*

Znanych jest wiele metod wytwarzania biopaliw w zależności od sposobu przetwarzania biomasy, włączając procesy biologiczne, termochemiczne i chemiczne.

Do metod biologicznych zalicza się:

- fermentację alkoholową surowców opartych na węglowodanach (celuloza, sacharoza, skrobia) do etanolu, który może być przetwarzany, w drodze chemicznej, do eterów ETBE,
- fermentację metanową biofrakcji odpadów, biomasy roślinnej będącej odpadami lub pochodzącej z upraw, w wyniku której pozyskuje się biogaz (z metanem i ditlenkiem węgla),
- fermentacje ciemne odpadów, do produkcji gazu (z wodorem i ditlenkiem węgla),
- produkcję biowodoru z użyciem glonów w procesach biofotolizy bądź bakterii w procesach fotofermentacji.

Metody fizyczne i chemiczne obejmują:

- produkcję olejów roślinnych,
- produkcję estrów metylowych/etylowych z olejów roślinnych i tłuszczu.

Do metod termochemicznych zalicza się:

- zgazowanie biomasy, efektem której jest syngaz,
- pirolizę (poprzez konwersję biomasy do oleju surowego i biokarbonizatu przy braku tlenu),
- procesy hydrotermiczne polegające na wzbogacaniu w obecności wody (HTU – *hydrothermal upgrading*) odpadowych olejów roślinnych i tłuszczu zwierzęcych, prowadzące do wytworzenia biooleju tzw. „zielonego diesla”.

Produkty otrzymane w drodze procesów termochemicznych można przetworzyć na inne biopaliwa, np. gaz syntezowy, który jest surowcem do wytwarzania węglowodorów syntetycznych, metanolu i mieszanych alkoholi.⁴⁰

Współczesne działania zmierzają w kierunku wytwarzania biopaliw na bazie surowców ubocznych i odpadowych z rolnictwa oraz przemysłu rolno-spożywczego. Z istniejących trendów technologii wynika, że w coraz większym stopniu będzie następowało wykorzystywanie rolnictwa do celów energetycznych. W przypadku biopaliw istnieje możliwość stosowania surowców pochodzenia

підкомплексу АПК, [W:] Збірник наукових праць Таврійського Державного Агротехнологічного Університету (Економічні науки), nr 2 (18) tom 2, 2012, s. 105–116; W. Kotowski, *Przetwarzanie biomasy do metanolu i paliw silnikowych*, [W:] Przemysł chemiczny, nr 82/8–9, 2003, s. 566–569; Z. Lubniewski, A. Gnadecka, K. Mikołajczak, G. Lewandowicz, *Zagospodarowanie odpadowych tłuszczów zwierzęcych metodami enzymatycznymi*, [W:] Nauka Przyroda Technologie, z.4 tom 3, 2009, s. 1–7; News of the week, *Enzymes play nicely together*, [W:] Chemical & Engineering News, vol. 90, no. 49, December 3, 2012, p. 9; News of the week, *Improved biomass catalysts*, [W:] Chemical & Engineering News, vol. 90, no. 49, December 3, 2012, p. 11–12.

⁴⁰ E. Klimiuk, M. Pawłowska, T. Pokój, tamże..., s. 3–4.

biologicznego, przetwarzanych np. na olej roślinny, bioolej lub biodiesel.⁴¹ Ich zastosowanie jest próbą odpowiedzi na rozwiązanie problemów energetyki i ochrony środowiska. Poziom substytucji paliw kopalnych przez biopaliwa ma wpływ na wielkość emisji CO₂, która jest uważana za główną przyczynę antropogenicznych zmian klimatu.

Przyjmuje się, że stopień wykorzystania biopaliw w praktyce transportowej zależy od wielu czynników, jak na przykład: ceny produktu, konkurencyjności innych paliw alternatywnych, polityki agrarnej, korzyści społecznych, właściwości estrów. Znaczenie może również mieć forma w jakiej będzie występowało paliwo: estru oleju rzepakowego, jego mieszaniny z ON, emulsji estrów z ON bądź też paliwa pochodzącego z krakingu oleju w rafineriach.⁴²

Znanych jest wiele metod produkcji biopaliw różniących się sposobem przetwarzania biomasy. Produkty wytworzone w procesach biologicznych, chemicznych oraz termochemicznych różnią się jakością i stopniem oczyszczenia. Na przykład, *oleje roślinne*, mogą być stosowane w silnikach wysokoprężnych tylko po ich odpowiednim przekonstruowaniu. Przemysł samochodowy nie stosuje czystych olejów roślinnych, głównie z powodu powstawania znacznych ilości osadów (nagaru) w komorze spalania wokół otworów wtryskowych. Wobec niemożności wykorzystania oleju w istniejących silnikach, należałoby zmodyfikować bądź paliwo – olej rzepakowy, bądź silniki. Obie drogi były i są stosowane. Niektóre wytwórnie (np. Elsbett w Niemczech) uruchomiły produkcję silników dostosowanych do napędu nieprzetworzonym olejem roślinnym. Silniki te chociaż uzyskują bardzo dobre wyniki nie są powszechnie stosowane z uwagi na wysoki koszt produkcji. W przypadku *biooleju*, surowcami do wytwarzania są różne postacie biomasy. Powstaje on w wyniku przetwarzania biomasy za pomocą metody szybkiej pirolizy (w czasie ok. 1 s. w temperaturze 400–600°C) przez kondensację wytwarzającej się „pary” z biomasy.⁴³ W rezultacie powstaje ciekły produkt olej pirolityczny o wartości opałowej ok. 16–19 MJ/kg. Powstaje również gaz i węgiel drzewny, które bezpośrednio są spalane i dostarczają ciepło na potrzeby procesu pirolizy. Olej powstający w tym procesie stanowi 60–75% masy paliwa. Może być on stosowany bezpośrednio jako paliwo (np. w kotłach, palnikach, turbinach, generatorach elektrycznych) lub wykorzystywany do wytwarzania innych substancji.⁴⁴ Wśród paliw wytwarzanych z roślin oleistych największym zainteresowaniem cieszy się *biopaliwo*

⁴¹ I. Papworth, B. Donnelly, I. Skinder, *UIC study on Railways and Biofuels*, Paris, UIC biofuels workshop, 2007.

⁴² C.I. Bocheński, *Biodiesel paliwo rolnicze*, Warszawa, Wydawnictwo SGGW, 2003, s. 5–11.

⁴³ S.N. Naik, V.V. Goud, P.K. Rout, A.K. Dalai, *Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review*, [W:] *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nr 14, 2010, p. 590; A. Chochowski, F. Krawiec, tamże..., s. 346–354.

⁴⁴ A. Chochowski, F. Krawiec, tamże..., s. 346–354; Ji-lu. Zheng, *Bio-oil from fast pyrolysis of rice husk: Yields and related properties and improvement of the pyrolysis system*, [W:] *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, nr 80(1), 2007, p. 30–35.

rzepakowe. Zasadniczym surowcem wyjściowym do jego produkcji jest olej rzepakowy, którego wytwarzanie jest procesem dwuetapowym, łączącym znane technologie mechaniczne stosowane w przemyśle olejarskim w połączeniu z technologiami stosowanymi w przemyśle chemicznym. R. Tytko rozpatruje trzy podstawowe technologie olejarskie stosowane w Polsce w zależności od skali uzysku produktu finalnego (tab. 18).

Tab. 18. Technologie olejarskie w zależności od skali produkcji

Olejarie	Charakterystyka technologii
Duże olejarnie przemysłowe	stosują wstępne tłoczenie oleju przy pomocy pras ślimakowych z ziarna poddanego kondycjonowaniu w prażalni. Technologia pozwala na uzyskanie trzech produktów: oleju surowego, oleju poekstrakcyjnego, śruty poekstrakcyjnej
Małe olejarnie	ok. 50 ton na dobę stosują proces jedno lub stopniowego tłoczenia na gorąco oleju z nasion rzepaku rozdrabnianych oraz kondycjonowanych. Efektem są: surowy olej, wyluki
Bardzo małe olejarnie	1–15 ton na dobę wykorzystują technologię końcowego tłoczenia na zimno stosując jedno lub dwustopniowy proces po uprzednim rozdrobieniu nasion i podgrzaniu ich do temperatury nie wyższej niż 45°C

Źródło: R. Tytko, *Odnawialne źródła energii*, Warszawa, OWG, 2009, s. 291–292.

Produkcja paliwa tzw. biodiesla opiera się na estryfikowaniu oleju rzepakowego alkoholem. Estry oleju rzepakowego mogą całkowicie zastępować olej napędowy z ropy naftowej lub stanowić jedynie dodatek. Estryfikacja oleju rzepakowego wymaga stosowania odpowiednich instalacji technologicznych. Biorąc pod uwagę dostępne instalacje wprowadzono umowną, opartą na wydajności instalacji, klasyfikację skali produkcji biopaliwa rzepakowego (tab. 19).

Tab. 19. Klasyfikacja instalacji do produkcji biopaliwa rzepakowego

Instalacja	Wydajność roczna, t	Wydajność dobową, t	Wydajność godz., t
Instalacja gospodarska	300	1	0,04
Instalacja mała	5000	16,66	0,69
Instalacja duża	20000	66,66	2,77
Instalacja przemysłowa	100000	333,33	13,88

Źródło: A. Chochowski, F. Krawiec, *tenże...*, s. 346–354.

W zależności od użytej technologii estry metylowe oleju rzepakowego przyjmują różne nazwy handlowe: biodiesel, raps-diesel, bioester, RME, diester, bionafta, i in. Symbol FAME (*Fatty Acid Methyl Ester*) został zastrzeżony dla estrów metylowych wyższych kwasów tłuszczowych, zaś FAEE dla estrów

etylowych wyższych kwasów tłuszczowych (*Fatty Acid Ethyl Ester*). Ze względu na rodzaj użytego surowca, z którego został wytworzony biodiesel, stosuje się również akronimy: PME – z oleju palmowego, SME – sojowego, WME – z tłuszczu odpadowych. Wszystkie te nazwy wskazują na paliwa wytwarzane z surowców pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które mogą mieć zastosowanie w silnikach stacjonarnych, napędzających pojazdy użytkowe oraz do zasilania pojazdów specjalnych, tab. 20.⁴⁵

Tab. 20. Właściwości przykładowych gatunków biodiesla

Surowiec	Ester	Liczba cetanowa	Temperatura		
			zmętnienia	krzepnięcia	zapłonu
Olej rzepakowy	metylowy	48–56	-6 do -3	-9	166–169
Olej rzepakowy	etylowy	67,5	1	-12	170
Olej sojowy	metylowy	49,6–51,5	-2 do +3	17 do 0	120
Olej palmowy	etylowy	56,2	8	6	-
Lój	metylowy	61,8	12 do 15,6	9,0 do 12,8	96–188
Tłuszcz posmażalniczy	metylowy	59	1	-3	>110

Źródło: B. Burczyk, *Biomasa – surowiec do syntez chemicznych i produkcji paliw*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011, s. 201–203; E. Klimiuk, M. Pawłowska, T. Pokój, tamże..., s. 204.

1.4.1. Produkcja olejów roślinnych

Zastosowanie olejów roślinnych jako paliwa napędowego testował twórca silnika wysokoprężnego R. Diesel.⁴⁶ W praktyce używanie czystych olejów jak paliwa silnikowego jest ograniczone z powodu dużej lepkości, niskiej liczby cetanowej, wysokiej temperatury zapłonu i wysokiej temperatury blokowania zimnego filtra.⁴⁷ W nieprzystosowanym technicznie silniku zastosowanie oleju nie jest korzystne. Stosowanie mieszaniny z olejem napędowym również nie rozwiązuje problemu.⁴⁸ Okazało się, że oleje roślinne (np. rzepakowy) mogą być

⁴⁵ T. Jokiniemi, J. Ahokas, *A review of production and use of first generation biodiesel in agriculture*, [W:] *Agronomy Research*, nr 11, 2013, p. 239–248; E. Klimiuk, M. Pawłowska, T. Pokój, *Biopaliwa – technologie dla zrównoważonego rozwoju*, Warszawa, PWN, 2012, s. 35–36; H. Piñkowska, *Techniczne aspekty produkcji biodiesla – nowe kierunki badań*, [W:] *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu. Technologia* 13, nr 30, 2008, s. 152–168.

⁴⁶ E.G. Shay, *Diesel fuel from vegetable oils: Status and opportunities*, [W:] *Biomass and Bioenergy*, nr 4, 1993, p. 227–242.

⁴⁷ E. Klimiuk, M. Pawłowska, T. Pokój, tamże..., s. 44.

⁴⁸ J. Tys, W. Piekarski, I. Jackowska, A. Kaczor, G. Zajac, P. Starobrat, *Technologiczne i ekonomiczne uwarunkowania produkcji biopaliwa z rzepaku*, Lublin, Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, 2003, s. 89.

używane jako paliwa silnikowe tylko po ich mechanicznym oczyszczeniu, ale wymaga to odpowiedniego przystosowania silników (np. silnik Elsbett'a).

Sam proces produkcji oleju roślinnego nie jest skomplikowany. Klasyczna produkcja oleju rzepakowego wymaga przygotowania surowca (oczyszczenia i suszenia ziarna). W kolejnym etapie ziarno jest rozdrabniane (ale nie musi) tzw. płatkowane. Następnie z ziaren wyłaczany jest olej. Zanieczyszczony resztkami makuchów olej poddawany jest filtracji.⁴⁹

Przystosowanie olejów jako biopaliwa polegało głównie na zmniejszeniu ich lepkości poprzez:

- mikroemulgowanie z niskocząsteczkowymi alkoholami (metanol, etanol lub butanol jako rozpuszczalniki) w obecności jonowego czy niejonowego emulgatora,
- termochemiczną konwersję oleju (pirolizę) lub kraking i wydzielenie właściwej frakcji drogą destylacji,
- transestryfikację przy pomocy małowcząsteczkowych alkoholi tj. metanol, etanol lub butanol.⁵⁰

Wykorzystanie estrów metylowych oleju rzepakowego rozwiązuje większość problemów. Wydaje się jednak, że optymalnym rozwiązaniem jest stosowanie mieszanek estrów oleju rzepakowego z olejem napędowym.⁵¹ Ze względu na jakość olejów przetwarzanych na estry rzepakowe zaleca ich produkcję w specjalistycznych zakładach, chociaż możliwe jest również przetwarzanie rzepaku w małych przetwórnich na własny użytek. Jeden i drugi sposób ma zarówno wady jak i zalety.

1.4.2. Technologie przetwarzania biomasy oleistej

Lipazy, w reakcjach enzymatycznych, są znane jako wykazujące zdolność do działania na alkohole tłuszczowe o dłuższym łańcuchu lepiej niż na te o krótkich łańcuchach.⁵² Również skuteczność transestryfikacji triglicerydów metanolu (metanoliza) może być mała w porównaniu ze skutecznością transestryfikacji triglicerydów etanolu w układach z lub bez rozpuszczalnika. Szereg badań prowadzono nad reakcją transestryfikacji trójglicerydów innych alkoholi, różnych katalizatorów, przy różnych stosunkach molowych i w różnych temperaturach. Wyniki i warunki doświadczalne niektórych badań zestawiono w tabelach 21 i 22.

⁴⁹ L.J. Sitnik, *Ekopaliwa silnikowe*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2004, s. 60–62; C.I. Bocheński, *Biodiesel paliwo rolnicze*, Warszawa, Wydawnictwo SGGW, 2003, s. 80–81.

⁵⁰ E. Klimiuk, M. Pawłowska, T. Pokój, tenże..., s. 44; S.P. Singh, D. Singh, *Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review*, [W:] *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nr 14, 2010, p. 200–216.

⁵¹ J. Tys, W. Piekarski, I. Jackowska, A. Kaczor, G. Zajac, P. Starobrat, tenże..., s. 89.

⁵² Y. Shimada, A. Sugihara, Y. Minamigawa, K. Higashiyama, K. Akimoto, S. Fujikawa, S. Komemushi, Y. Tominaga, *Enzymatic enrichment of arachidonic acid from Mortierella single-cell oil*, [W:] *Journal of the American Oil Chemists' Society*, nr 75, 1998, p. 1213–1217.

Różne rodzaje alkoholi pierwszorzędowych, drugorzędowych o prostych i rozgałęzionych mogą być stosowane w reakcji transestryfikacji z udziałem lipazy jako katalizatora (tab. 22). Linko i inni wykazali możliwość produkcji szeregu biodegradowalnych estrów i poliestrów z użyciem lipazy jako biokatalizatora. Linko i inni pokazali wytwarzanie różnych biodegradowalnych estrów i poliestrów z lipazą w roli biokatalizatora.

W transestryfikacji oleju rzepakowego z 2-etylo-1-heksanolem uzyskano 97% stopień konwersji z estru przy użyciu proszku lipazy *candida rugosa*.⁵³ De i inni badali stopień konwersji estrów alkoholi tłuszczowych (C_4 – $C_{18:1}$) stosując unieruchomioną lipazę *rhizomucor miehei* (lipozyme IM-20) w układzie bez rozpuszczalnika. Molowy procent konwersji wszystkich odpowiednich estrów alkoholi mieścił się w zakresie od 86,8 do 99,2%, podczas gdy temperatura topnienia estrów zwiększała się systematycznie wraz ze wzrostem długości łańcucha alkoholu (od C_4 do C_{18}) oraz zmniejszała się wraz z włączeniem nienasyconego wiązania przy tej samej długości łańcucha (C_{18} – $C_{18:1}$).⁵⁴ Transestryfikacja triglicerydów oleju słonecznikowego, oleju rybnego i tłuszczu z wykorzystaniem etanolu, tj. etanoliza także była badana. W każdym przypadku wysoką 80% wydajność uzyskano przy użyciu lipazy z *m. miehei*, *candida antarctica*, *pseudomonas cepacia*.⁵⁵ Nelson i inni badali możliwości zastosowania lipazy w transestryfikacji z krótkołańcuchowymi alkoholami w celu otrzymania estrów alkilowych. Lipaza z *m. miehei* okazała się najbardziej wydajna do konwersji triglicerydów do ich estrów alkilowych z alkoholami pierwszorzędowymi, podczas gdy lipaza z *c. antarctica* była najbardziej wydajna w transestryfikacji triglicerydów z drugorzędowymi alkoholami, prowadzącej do rozgałęzionych estrów alkilowych. Maksymalną konwersję w wysokości 94,8–98,5% dla pierwszorzędowych alkoholi takich jak: etanol, etanol, propanol, butanol i izobutanol oraz 61,2–83,8% dla drugorzędowych alkoholi, tj. izopropanolu i 2-butanolu uzyskano w obecności heksanu jako rozpuszczalnika. Jednakże w reakcjach bez rozpuszczalnika wydajność z metanolem i etanolem była mniejsza niż ta uzyskana w obecności heksanu (w szczególności wydajność z metanolem spadła do 19,4%).⁵⁶ Mittelbach opisał transestryfikację z użyciem pierwszorzędowych alkoholi (metanol, etanol, 1-butanol) i z eterem naftowym (lub bez) jako rozpuszczalnikiem. Wydajności estru etanolu i 1-butanolu były stosunkowo wysokie, nawet w reakcjach bez rozpuszczalnika. Abigor i inni wykazali, że w konwersji oleju palmo-

⁵³ Y.-Y. Linko, M. Lämsä, X. Wu, E. Uosukainen, J. Seppälä, P. Linko, *Biodegradable products by lipase biocatalysis*, [W:] Journal of Biotechnology, nr 66, 1998, p. 41–50.

⁵⁴ B.K. De, D.K. Bhattacharyya, C. Bandhu, *Enzymatic synthesis of fatty alcohol esters by alcoholysis*, [W:] Journal of the American Oil Chemists' Society, nr 76, 1999, p. 451–453.

⁵⁵ S.P. Singh, D. Singh, *Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review*, [W:] Renewable and Sustainable Energy Reviews, nr 14, 2010, p. 206–208.

⁵⁶ L.A. Nelson, T.A. Foglia, W.N. Marmer, *Lipase-catalyzed production of biodiesel*, [W:] Journal of the American Oil Chemists' Society, nr 73, 1996, p. 1191–1195.

wego do estrów alkilowych z wykorzystaniem lipazy *p. cepacia*, etanol dał najwyższy stopień konwersji 72%, podczas gdy w przypadku estrów metylowych osiągnięto tylko 15%.

Tab. 21. Przykładowe metody transestryfikacji

Rodzaj		Katalizator	Alkohol	Temp.	Stosunek alk./olej	Wydajność
Mikroalgi		kwas siarkowy	metanol	30°C	56:1	60%
Otręby ryżowe		dwustopniowa reakcja z kwasowym katalizatorem oraz kwasem siarkowym	metanol	60°C	10:1	< 96%
Olej	karang	KOH, stałe katalizatory kwasowe np. zeolit	metanol tetrahydrofuran	60°C	10:1	92%
	z orzeszków ziemnych	NaOH	metanol	50°C	-	90%
	sojowy	bez katalizatora	(nadkryt. CO ₂ /CH ₄ O) =0,1	280°C	24:1	98%
	sojowy	stałe katalizatory kwasowe, siarczan cyny, tlenki cyrkonu	metanol	200°C– –300°C	-	90%
	słonecznikowy	nadkrytyczne ciecze, nadkrytyczny CO ₂	nadkrytyczny metanol, etanol	200°C– –400°C	-	80% –100%
	canola	dwustopniowy proces z KOH	metanol	25°C	6:1	87%
	słonecznikowy posmażalniczy	KOH	metanol	25°C	6:1	90%

Źródło: Na podstawie S.P. Singh, D. Singh, tenże..., p. 208.

Ogólnie rzecz biorąc, wydajność transestryfikacji triglicerydów z metanolem jest bardzo mała w porównaniu z transestryfikacją etanolem zarówno w układach z, jak i bez rozpuszczalnika.⁵⁷

⁵⁷ S.P. Singh, D. Singh, tamże..., p. 206–208.

Tab. 22. Przykłady reakcji enzymatycznych transestryfikacji z użyciem różnych alkoholi i lipazy

Olej	Alkohol	Lipaza (enzym)	% Konwersji	Rozpuszczalnik
Rzepak	2-etyl-1-hexanol	<i>c. rugosa</i>	97	brak
Mowrah, Pestka mango	C-C alkohole (alk. alifatyczne)	<i>m. miehei</i> (lipozyme IM-20)	86,8–99,2	brak
Słonecznik	etanol	<i>m. meihei</i> (lipozyme)	83	brak
Ryba	etanol	<i>c. anturctica</i>	100	brak
Wtórny tłuszcz posmażalniczy z restauracji	etanol	<i>j. cepacia</i> (lipase PS-30) + <i>c. anturctica</i> (lipase SP435)	85,4	brak
Tój, sadło, soja i rzepak	metanol, etanol, propanol, butanol	<i>m. miehei</i> (lipozyme IM60), <i>c. antarctica</i> (SP435), <i>m. miehei</i> (lipozyme IM60), <i>m. miehei</i> (lipozyme IM60)	94,8–98,5 61,2–83,8 19,4–65,5	heksan
Słonecznik	metanol, etanol	<i>p. juorescens</i>	3, 79, 82	brak, nafta
Ziarno palmowe, olej palmowy	metanol, etanol	<i>i. cepuciu</i> (lipase PS-30)	15, 72	brak
Olej sojowy	metanol	<i>rhizomucor miehei</i> (lipozyme IM-77)	92,2	-
Olej sojowy	metanol	<i>c. antarctica lipase</i>	93,8	Roztwór 0,5 molowy MeOH wodorotlenku jednowarto- ściowego metalalu (KOH, NaOH)
Olej słonecznikowy	metanol	<i>pseudomonas fluorescens</i>	> 90%	olej: metanol
Olej palmowy	metanol	<i>rhizopus oryzae</i>	55%	woda

Źródło: Na podstawie S.P. Singh, D. Singh, tenże..., p. 208.

1.4.2.1. Technologia przetwarzania rzepaku na estry kwasów tłuszczowych

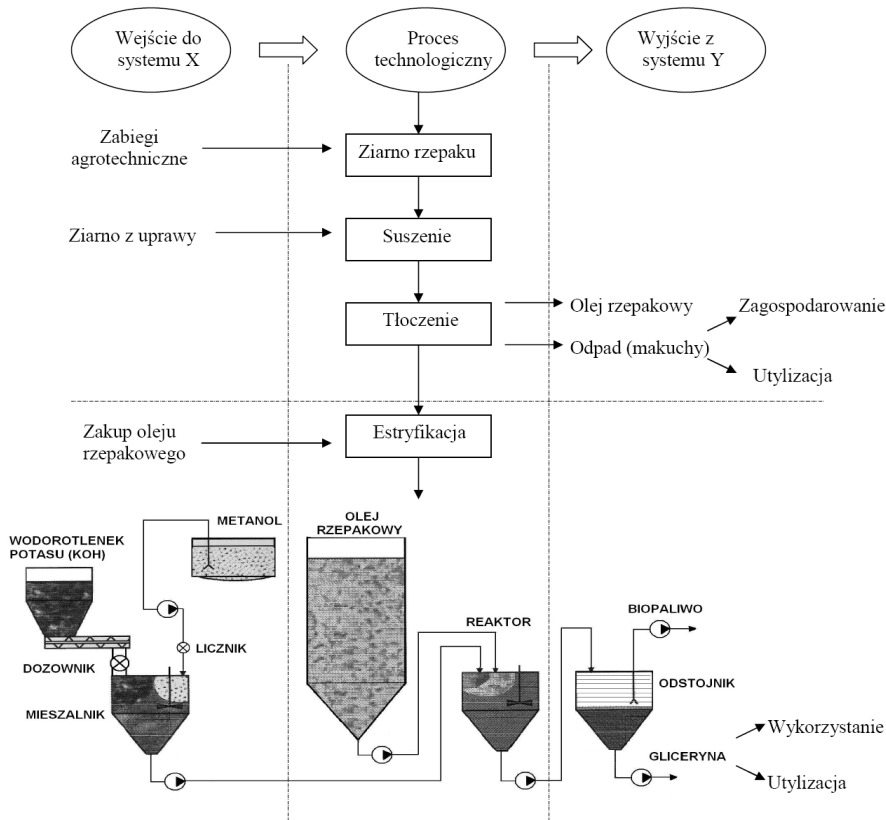
Jak wspomniano wcześniej, surowy olej roślinny nie może być użyty w silnikach diesla. Zatem konieczne jest jego przetworzenie na estry kwasów tłuszczowych metodą transestryfikacji, która opiera się na wykorzystaniu surowców pochodzących z tłuszczów zwierzęcych, olejów roślinnych surowych, a także używanych do smażenia frytek, ryb i mięs. Zasadniczym surowcem wyjściowym do produkcji biodiesla tą metodą jest rzepak.

Do silników z zapłonem samoczynnym jako paliwa alternatywne oferowane są przeważnie estry metylowe wyższych kwasów tłuszczowych, wytwarzane z olejów roślinnych. Skala produkcji znacząco determinuje stosowane technologie. W zależności od rozmiarów tej skali stosuje się dwie podstawowe technologie pozyskiwania biodiesla:

- 1) „zimna” – znajduje zastosowanie w małych olejarniach o zdolnościach przerobowych 1–15 t/dobę. Przed tłoczeniem surowiec jest częściowo rozdrabniany i podgrzewany. Proces przeprowadza się w temperaturach 20–70°C pod ciśnieniem atmosferycznym przy użyciu katalizatorów alkaicznych,
- 2) „gorąca” – stosowana w większych zakładach produkcyjnych o zdolnościach przerobowych ok. 50 t/dobę. Przed tłoczeniem, ziarna poddawane są uprzednio etapowi kondycjonowania w prażalni, którego celem jest ułatwienie wydobycia tłuszczu z surowca. Transestryfikacja przeprowadzana jest w temperaturze 240°C pod ciśnieniem 10 MPa (metoda stosowana w zakładach chemicznych).⁵⁸

Produkcja biodiesla to technologia wieloetapowa, która łączy procesy mechaniczne i chemiczne, rys. 11.

⁵⁸ J. Merkisz, I. Pielecha, *Alternatywne napędy pojazdów*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2006, s. 60–65; E. Klimiuk, M. Pawłowska, T. Pokój, tamże..., s. 41.

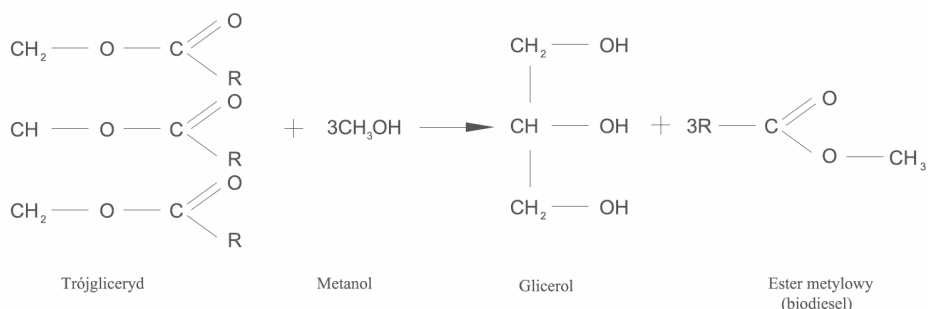


Rys. 11. Przykładowy system produkcyjny wytwarzania biodiesla

Źródło: opracowanie własne.

Pokazany schemat produkcji biodiesla (rys. 11) przedstawia produkcję, która może być realizowana w kilku wariantach synchronizacji podsystemów produkcyjnych tj. może opierać się na: zakupie ziarna, bądź zakupie oleju oraz następującej kolejno estryfikacji. Jeśli ścieżka technologiczna rozpoczyna się od zakupu ziarna, to obejmuje następujące procesy: czyszczenie surowca, suszenie, poddawanie działaniu termicznemu. Po przygotowaniu surowca wykonuje się tłoczenie przy użyciu pras ślimakowych. Makuchy zawierające olej, w ilości ok. 20%, poddawane są ekstrakcji za pomocą rozpuszczalnika. Z jednej tony ziarna rzepakowego można otrzymać ok. 350 kg surowego oleju i ok. 650 kg makuchów. Kolejny etap to filtracja, destylacja, w trakcie której olej oczyszczany jest z heksanu. Oczyszczanie oleju wykonywane jest drogą sedymentacji (nierozpuszczone cząstki zawieszone w oleju, w wyniku siły ciężkości, opadają na dno zbiornika) lub filtracji (przepływ oleju przez siatkę filtracyjną filtra płytowego, na którym pozostają drobne cząsteczki wyloku z oleju).

Jeśli technologia przetwórcza rozpoczyna się od zakupu surowego oleju (zawierającego produkty uboczne po ekstrakcji), to niezbędna jest jego rafinacja (odśluzowywanie, odkwaszanie, wybielanie, dezodoryzacja, odwoskowanie). Surowy olej rzepakowy nie znajduje praktycznego zastosowania w silnikach wysokoprężnych ze względu na niską liczbę cetanową, dużą lepkość, obecność wolnych kwasów tłuszczowych oraz braku stabilności, ujawniającej się w postaci zmian zachodzących w czasie magazynowania.⁵⁹



Rys. 12. Schemat reakcji transestryfikacji

Źródło: S.N. Naik, V.V. Goud, P.K. Rout, A.K. Dalai, *Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review*, [W:] *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nr 14, 2010, p. 583.

Dlatego często stosowanym procesem modyfikacji chemicznej olejów roślinnych jest proces ich transestryfikacji (rys. 12), powodującej przemianę trójglicerydów surowego oleju rzepakowego, w reakcji z metanolem (rzadziej etanolem), prowadzonej w obecności katalizatora (NaOH lub KOH,⁶⁰ do metylowych estrów kwasów tłuszczowych (z 350 kg oleju, po dodaniu komponentów, uzyskuje się 340 kg biopaliwa).⁶¹ Produktem ubocznym tej produkcji jest gliceryna (ok. 10%), która odpowiednio oczyszczona ma zastosowanie np. w przemyśle

⁵⁹ E. Bialecka-Florjańczyk, I. Stolarzewicz, D. Kucharski, *Mikrobiologiczne metody otrzymywania biodiesla*, [W:] *Biotechnologia*, nr 4(87), 2009, s. 74–87; R. Tytko, *Odnawialne źródła energii*, Warszawa, OWG, 2009, s. 291–294; E. Klimiuk, M. Pawłowska, T. Pokój, *Biopaliwa – technologie dla zrównoważonego rozwoju*, Warszawa, PWN, 2012, s. 38–44.

⁶⁰ K.S. Tyson, J. Bozell, R. Wallace, E. Petersen, L. Moens, *Biomass Oil Analysis: Research Needs and Recommendations. Technical Report*, Colorado, NREL National Renewable Energy Laboratory, 2004, p. 55.

⁶¹ L.J. Sitnik, *Ekopaliwa silnikowe*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2004; R. Tytko, tamże..., s. 291–294; J.V. Gerpen, G. Knothe, *Biodiesel Production. Basics of the Transesterification Reaction*, [W:] *The Biodiesel Handbook*, AOCS Press, Champaign 2005, p. 34–46.

kosmetycznym, farmaceutycznym i spożywczym.⁶² Więcej informacji o zagospodarowaniu gliceryny można znaleźć w innych opracowaniach np. J. Tysa czy W. Podkówki.⁶³

1.4.3. Biopaliwa z lignocelulozy

Biopaliwa drugiej generacji otrzymuje się z powszechnie dostępnej i taniej biomasy lignocelulozowej. Źródłami takiej biomasy są:

- suche odpady organiczne (np. siano, słoma, ścinki drzew, odpady zbożowe i paszowe, drewno opałowe, odpady z tartaków, łodygi roślin uprawnych),
- mokre odpady organiczne (np. obornik, gnojowica, odpady z różnych gałęzi przemysłu: tłuszczowego, cukrowego, młynarskiego, papierniczego, owocowo-warzywnego).
- uprawy szybko rosnących drzew (wierzby, topoli, eukaliptusa) i niektórych gatunków traw, drzewa liściaste i iglaste, trzcina, proso różgowe.⁶⁴

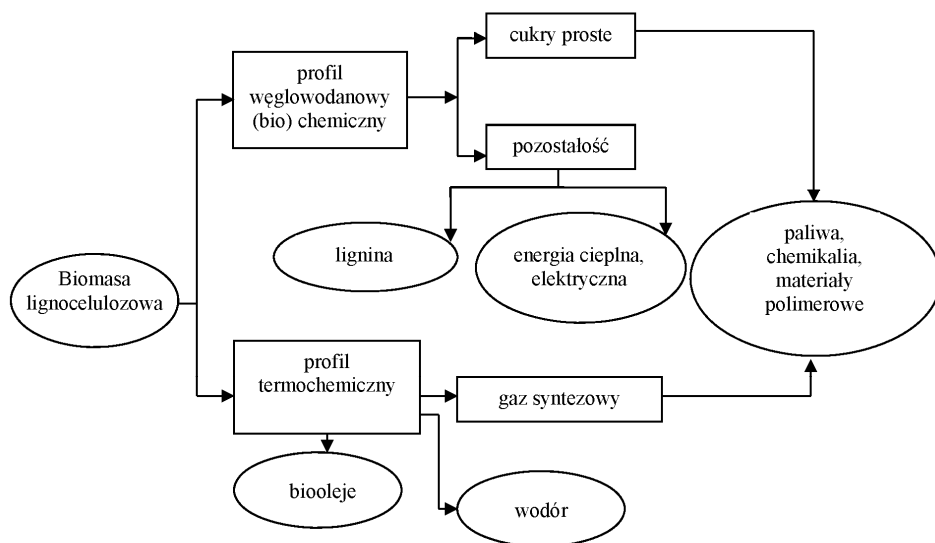
Biomasa bogata w lignocelulozę jest trudno rozkładanym surowcem i otrzymywanie z niej biopaliw nie jest łatwe. Lignoceluloza jest biopolimerem, w skład którego wchodzi następujące frakcje: celulozowa, hemicelulozowej, ligninowej.⁶⁵ Przetwarzanie takiej biomasy odbywa się w biorafineriach lignocelulozowych, których schemat przedstawiono na rys. 13. Klasyfikację biopaliw drugiej generacji z surowców lignocelulozowych zawarto w tab. 23.

⁶² UNIDO, *Biodiesel production promotion countrywide feasibility study for a potential croatian biodiesel industry. Final Technical Report*, Vienna, United Nations Industrial Development Organization, 2006, p. 36.

⁶³ J. Tys, W. Piekarski, I. Jackowska, A. Kaczor, G. Zając, P. Starobrat, *Technologiczne i ekonomiczne uwarunkowania produkcji biopaliwa z rzepaku*, Lublin, Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego PAN, 2003, s. 88–89; red. W. Podkówka, *Biopaliwo, gliceryna, pasza z rzepaku: praca zbiorowa*, Bydgoszcz, Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, 2004.

⁶⁴ B. Burczyk, tamże..., s. 214–215; J. Lalak, A. Kasprzycka, A. Murat, E.M. Paprota, T. Tys, *Obróbka wstępna biomasy bogatej w lignocelulozę w celu zwiększenia wydajności fermentacji metanowej*, [W:] *Acta Agrophysica*, nr 21, 2014, s. 52–53

⁶⁵ S.N. Naik, V.V. Goud, P.K. Rout, A.K. Dalai, *Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review*, [W:] *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nr 14, 2010, p. 593.



Rys. 13. Schemat biorafinerii lignocelulozowej⁶⁶

Źródło: B. Burczyk, *Biomasa – surowiec do syntez chemicznych i produkcji paliw*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011, s. 214.

Tab. 23. Biopaliwa drugiej generacji z surowców lignocelulozowych

Typy biopaliw	Rodzaj biopaliwa	Proces produkcyjny
Bioetanol	etanol celulozowy	zaawansowane metody hydrolizy enzymatycznej, fermentacja
Syntetyczne biopaliwa	konwersja biomasy do cieczy (BTL) syntetyczny diesel (Fischer-Tropsch FT) biometanol wyższe alkohole (butanol i mieszaniny) eter dwumetylowy (DME)	zgazowanie i synteza
Metan	bio-metan (SNG)	zgazowanie i synteza
Wodór	wodór	zgazowanie i synteza, procesy biologiczne

Źródło: Na podstawie A. Eisentraut, *Sustainable Production of Second – Generation Biofuels – Potential and perspectives in major economies and developing countries*, International Energy Agency, 2010 p. 22–23.

⁶⁶ B. Burczyk, tenże..., s. 214.

Z uwagi na dużą różnorodność ww. surowców oraz różnice w ich właściwościach fizycznych i chemicznych konieczne jest opanowanie takich sposobów produkcji, które gwarantowałyby uzyskanie pożądanych rezultatów przy minimalnych kosztach produkcji.⁶⁷ Aby otrzymać z lignocelulozy paliwa motorowe, należy usunąć z niej nadmiar tlenu i zastosować tak dobrane metody tworzenia nowych wiązań C-C, aby było można kontrolować masy cząsteczkowe właściwych węglowodorów. Proponuje się następujące warianty do realizacji tak postawionego celu:

- procesy termochemicznego przetwarzania nierozdzielnej lignocelulozy (szybka piroliza, upłynnianie, zgazowanie),
- przemiany biochemiczne prowadzące do wytworzenia biogazu i wodoru (drogą fermentacji, do której wykorzystywana jest biomasa odpadowa pochodząca z odpadów: domowych, poprodukcyjnych, rolno-spożywczych),⁶⁸
- chemiczne oddzielanie od ligniny węglowodanów (chemiczne przetwarzanie cukrów na biopaliwa).⁶⁹

1.4.4. Wykorzystanie glonów do produkcji biopaliw

Duże nadzieje pokładane są w biopaliwach trzeciej generacji pozyskiwanych z alg (glonów, mikroalg). Są one organizmami samożywnymi, żyjącymi w środowisku wodnym lub w miejscach wilgotnych.⁷⁰ Występują we wszystkich strefach geograficznych, przeważnie na półkuli północnej, gdzie rocznie wydobywa się ich ok. 1,5 mln t.⁷¹ Dzięki charakterystycznym właściwościom rosną one szybko, stąd też plony glonów mogą być zbierane praktycznie przez cały rok.⁷² Istnieje wiele gatunków alg (ok. 40. 000), rys. 14.

⁶⁷ J. Lalak, A. Kasprzycka, A. Murat, E.M. Paprota, T. Tys, *Obróbka wstępna biomasy bogatej w lignocelulozę w celu zwiększenia wydajności fermentacji metanowej*, [W:] Acta Agrophysica, nr 21, 2014, s. 56.

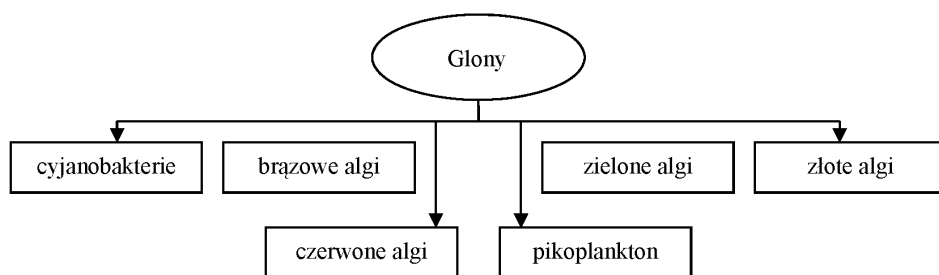
⁶⁸ D. Liu, D. Liu, R.J. Zeng, I. Angelidaki, *Hydrogen and methane production from household solid waste in the two-stage fermentation process*, [W:] Water Research, vol. 40, issue 11, 2006, p. 2230–2236; B.A. Tokay, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Sixth Completely Revised Edition*, Weinheim, Sixth Completely Revised Edition Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, vol. 5, 2003, p. 303–309.

⁶⁹ B. Burczyk, tamże..., s. 214–215.

⁷⁰ K. Jacobson, R. Gopinath, L.Ch. Meher, A.K. Dalai, *Solid acid catalyzed biodiesel production from waste cooking oil*, [W:] Applied Catalysis B: Environmental, vol. 85, 2008, p. 86–91.

⁷¹ B. Igliński, R. Buczkowski, M. Cichosz, *Technologie bioenergetyczne*, Toruń, Wydawnictwo Naukowe Mikołaja Kopernika, 2009, s. 235–240.

⁷² B. Burczyk, tamże..., s. 240–241.



Rys. 14. Przykładowe rodzaje alg

Źródło: S.N. Naik, V.V. Goud, P.K. Rout, A.K. Dalai, *Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review*, [W:] Renewable and Sustainable Energy Reviews, nr 14, 2010, p. 594.

Ocenia się, że pod względem produkcji oleju są od 15–300 razy wydajniejsze niż tradycyjne źródła i nie stanowią konkurencji na rynku produktów spożywczych, tab. 24.

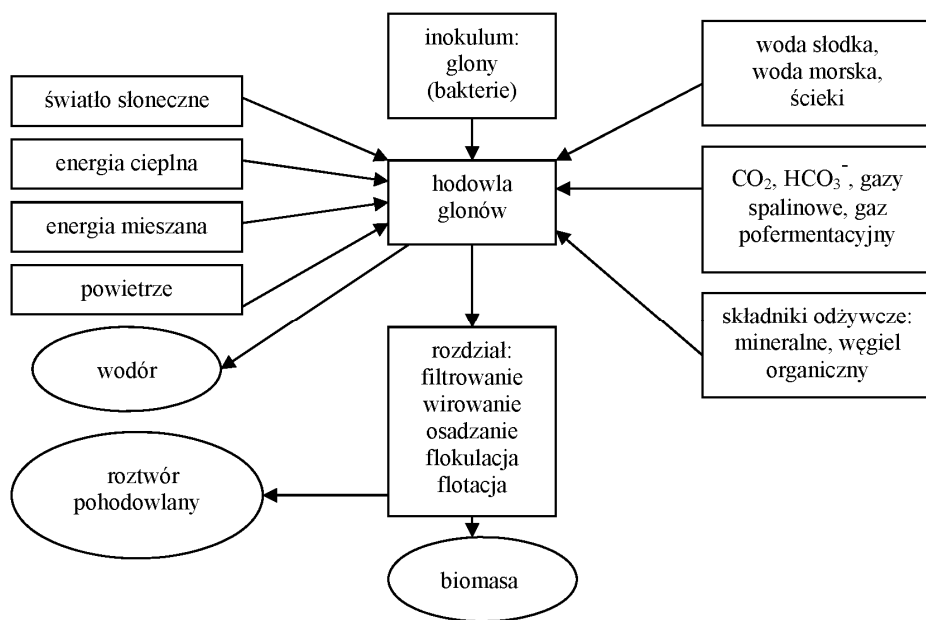
Tab. 24. Wydajność i zawartość oleju w wybranych roślinach oleistych i algach

Uprawa	Wydajność oleju [dm ³ /ha]	Zawartość oleju [% s.m.]
Kukurydza	172	-
Soja	446	-
Rzepak	1190	-
Jatrofa	1892	-
Orzech kokosowy	2689	-
Olej palmowy	5950	-
Mikroalgi	59000–137000	
<i>Isochrysis sp.</i>		25–33
<i>Nannochloropsis sp.</i>		31–68
<i>Nitzschia sp.</i>		45–47

Źródło: Y. Chisti, *Biodiesel from microalgae*, [W:] Biotechnology Advances, vol. 25, 2007, p. 294–306.

Do wzrostu alg niezbędne jest światło, woda, dwutlenek węgla, sole mineralne i temperatura w granicach 20–30°C. Metody hodowli glonów (rys. 15) to systemy:

- otwarte stawy „kanałowe”, które budowane są w formie zamkniętej pętli recykulacyjnej tworzącej kanał. Cyrkulacja i mieszanie odbywa się za pomocą turbiny, która zapobiega sedymentacji glonów. Biomasa z glonów jest odprowadzana za turbiną na końcu pętli recykulacyjnej. Problemem, który podwyższa koszty produkcji biopaliwa, jest zbiór alg.
- zamknięte: na powietrzu i w pomieszczeniach (fotobioreaktory), które sprzyjają kontrolowaniu rozwoju mikroorganizmów i pozyskiwaniu większej ilości biomasy niż w przypadku systemów otwartych. Jest to możliwe dzięki fotoreaktorom zbudowanym z materiału przepuszczającego światło.⁷³ Stosowane są trzy typy fotobioreaktorów: cylindryczne (rurowe), panelowe i pionowo-kolumnowe.⁷⁴



Rys. 15. Schemat hodowli glonów

Źródło: B. Burczyk, tamże..., s. 197.

⁷³ E. Molina, F.G. Acien Fernández, F. García Camacho, F. Camacho Rubio, Y. Chisti, *Scale-up of tubular photobioreactors*, [W:] *Journal of Applied Phycology*, vol. 12, 2000, p. 355–368; B. Igliński, R. Buczkowski, M. Cichosz, *Technologie bioenergetyczne*, Toruń, Wydawnictwo Naukowe Mikołaja Kopernika, 2009, s. 235–240.

⁷⁴ Y. Chisti, tamże..., p. 294–306.

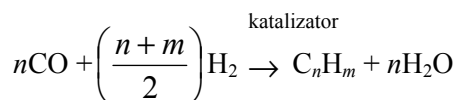
Ze względów ekonomicznych, jak dotąd, nie produkuje się biopaliw z alg na skalę wielkoprzemysłową. Na cenę biodiesla z alg wpływają wysokie koszty inwestycyjno-procesowe związane z pozyskiwaniem biomasy ze stawów hodowlanych, a następnie lipidów z komórek glonów.⁷⁵

1.4.5. Biopaliwa syntetyczne metodą Fishera-Tropscha

Olej napędowy pozyskiwany jest z ropy naftowej. Olej syntetyczny może być otrzymywany z gazu syntezowego, który z kolei jest uzyskiwany albo z biomasy, albo gazu ziemnego lub węgla, z którego wytwarzane są biopaliwa ciekłe.⁷⁶ Technologie otrzymywania biopaliw syntetycznych z biomasy określane są jako BTL (*Biomass-to-liquid*).⁷⁷

Proces technologiczny pozyskiwania syngazu z biomasy obejmuje następujące etapy: transport surowca, magazynowanie, rozdrabianie, suszenie, zgazowanie, oczyszczanie, kondycjonowanie, usuwanie z popiołów. Tak otrzymany syngaz jest stosowany w syntezie Fischera-Tropscha do produkcji płynnych paliw motorowych.⁷⁸

Konwersja gazu syntezowego metodą *FT* polega na reakcjach katalitycznych prowadzących do otrzymania węglowodorów z mieszaniny tlenku węgla i wodoru, co wraza następujące równanie.⁷⁹



Produkty tej metody to węglowodory alifatyczne, nienasycone lub nasycone. W trakcie syntezy powstają niewielkie ilości związków tlenowych, przeważnie alkoholi, a produktem ubocznym jest woda. Mechanizm zgazowania biomasy jest wieloetapowy (rys. 16), polegający na:

- zgazowaniu biomasy celem otrzymania gazu surowego,
- oczyszczaniu i wzbogacaniu gazu surowego,
- konwersji syngazu do węglowodorów (*FT*),
- uszlachetnianiu produktów syntezy.

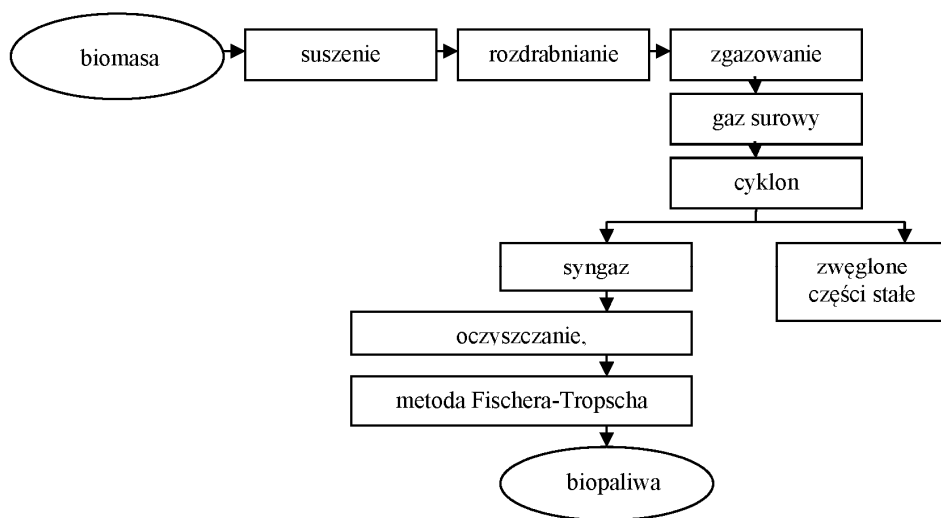
⁷⁵ B. Burczyk, *Biomasa – surowiec do syntez chemicznych i produkcji paliw*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011, s. 240–241.

⁷⁶ L.J. Sitnik, *Ekopaliwa silnikowe*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2004, s. 160.

⁷⁷ E. Klimiuk, M. Pawłowska, T. Pokój, *Biopaliwa – technologie dla zrównoważonego rozwoju*, Warszawa, PWN, 2012, s. 222–226.

⁷⁸ B. Burczyk, *Biomasa – surowiec do syntez chemicznych i produkcji paliw*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011, s. 236–240.

⁷⁹ S.N. Naik, V.V. Goud, P.K. Rout, A.K. Dalai, *Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review*, [W:] *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nr 14, 2010, p. 591; E. Klimiuk, M. Pawłowska, T. Pokój, tamże..., s. 222–226.



Rys. 16. Schemat zgazowania biomasy

Źródło: B. Burczyk, tenże..., s. 236–240.

Metoda *FT* może przebiegać jako proces niskotemperaturowy (200–240°C) lub wysokotemperaturowy (300–350°C) w obecności katalizatorów (kobaltowego lub żelazowego). Do wytwarzania substytutów oleju napędowego zaleca się proces niskotemperaturowy w reaktorze zawieszinowym z udziałem katalizatora kobaltowego.

Zaletą paliw pozyskiwanych technologią *BTL* jest wysoka ich czystość. Natomiast głównym problemem jest wysoka cena produkcji, którą można obniżyć budując duże zintegrowane obiekty przemysłowe o większej przepustowości.⁸⁰

⁸⁰ E. Klimiuk, M. Pawłowska, T. Pokój, tenże..., s. 222–234.

2. System i jego funkcjonowanie

Człowiek żyje w świecie materialnym, który był zawsze przedmiotem jego poznania obiektów, zdarzeń, zjawisk, z którymi spotyka się w życiu codziennym. Proces poznawania zależy od poziomu wiedzy człowieka, osiągnięć i trendów nauki. Świat materialny to „świat systemów” materialnych tworzonych przez przyrodę, które człowiek poznaje, a następnie doskonali. Poznawanie tego świata odbywa się za pomocą badań, obserwacji, eksperymentów lub za pomocą badań modeli, sztucznych eksperymentów na tych modelach i coraz częściej za pomocą symulacji komputerowej. Ustalanie schematów i budowanie struktur, według których zachodzą zjawiska, procesy jest typowym działaniem poznawczym świata materialnego w postaci jego modeli. Już w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku powstawały trendy badań systemów.

Myślenie systemowe realizowane jest wtedy, gdy: „przedmiot badania jest traktowany jako system, analizie są poddawane możliwie wszystkie oddziaływania danego systemu na otoczenie i otoczenia na ten system, jeżeli istnieje taka możliwość, to optymalizowane są struktury i działanie systemu oraz wzajemne związki systemu z jego otoczeniem”. Takie działania wymagały opracowania naukowych metod i ich rozwiązań. Rozwinęła się nowa dyscyplina nauki – teoria systemów, która wypracowała naukowy język dotyczący systemów.⁸¹ Teoria systemów pozwala na przenoszenie wyników badań naukowych z jednej dziedziny do drugiej, w której brak modeli. Umożliwia to budowanie modeli teoretycznych w dziedzinach, a także sprzyja porozumiewaniu się specjalistów różnych dziedzin.⁸² Zasadą inżynierii systemów jest rozpowszechnianie się systemowego sposobu postrzegania rzeczywistości, co wpływa na zaangażowanie wielu dyscyplin w badaniach interdyscyplinarnych.⁸³ Rosnące możliwości poznania naukowego stymulowanego badaniami teoretycznymi, eksperymentalnymi i modelowymi powodują lepsze rozumienie budowy i ewolucji różnych systemów. Badanie poszczególnych elementów nie umożliwia jeszcze właściwego poznania całości, która według Arystotelesa, jest czymś więcej niż sumą poszczególnych części. Muszą jeszcze być uwzględnione relacje między tymi elementami i ich właściwościami, które dopiero wtedy określają całość jako składający się z elementów obiekt, czyli system. Żaden element nie może być zaklasyfikowany do systemu, bez uprzedniego określenia celu, który pokazują relację systemotwórczą.⁸⁴

⁸¹ M. Jaros, S. Pabis, *Inżynieria systemów*, Warszawa, SGGW, 2007, s. 5–16.

⁸² T. Nowakowski, *Niezawodność systemów logistycznych*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011, s. 36–43.

⁸³ B. Cogan, *Introductory chapter a few words about systems engineering*, [W:] *Systems engineering – practice and theory*, Rijeka, red. B. Cogan, Intech, 2012, s.1–9.

⁸⁴ Z. Matuszak, *Wybrane zagadnienia dotyczące opisu systemów technicznych*, [W:] *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, nr 5 (77), 2005, s. 371–382.

Centralnym pojęciem analizy systemowej jest system, który jest istotnym zjawiskiem dla opisu współczesnych przemian w nauce i technice. Sposób poznania świata zależy od wielkości zjawisk, z którymi się spotykamy. Interpretację tego pojęcia w ujęciu ogólniejszym można rozwinąć na podstawie literatury. Słowo system pochodzi z języka greckiego i jest używane w kilku znaczeniach. W książce M. Jaros i S. Pabis termin „system” rozumiany jest jako „wyodrębniony zbiór obiektów materialnych lub abstrakcyjnych, połączonych związkami tworzącymi strukturę systemu”.⁸⁵ Tymczasem według J. Dietrycha system jest „własnością środków technicznych i nie jest nazwą układu materialnego. To układ relacji, przekształceń i relacji sprzężeń”. W takim ujęciu system rozumiany jest jako zbiór własności układów realizujący działania przekształcające: logiczne i matematyczne, a przedmiotem przekształceń jest informacja zapisana przy pomocy odpowiednich znaków.⁸⁶ Z kolei E. Pająk przy definiowaniu pojęcia systemu twierdzi, że jest to „powiązany ze sobą zbiór elementów działających wspólnie dla osiągnięcia założonego celu”.⁸⁷ Ponadto w pracy A. Gołąbek *Metodyka badań...*⁸⁸ przyjęto, że system składa się ze zbioru obiektów łącznie z relacjami pomiędzy tymi obiektami i ich własnościami.⁸⁹ Do wejść i wyjść z systemu zaliczane są strumienie materiałów, wyrobów, energii, informacji. Mogą to być strumienie ciągłe lub dyskretne.⁹⁰

Warto zwrócić uwagę na najprostszą definicję systemu podaną w E. Pająk *Zarządzanie produkcją...*⁹¹ sformułowaną przez S. Mynarskiego, który formułuje system jako celowo określony zbiór elementów i relacji między tymi elementami i ich własnościami. Ta wyodrębniona zbiorowość elementów powiązana jest zależnościami lub oddziaływaniem. Cechy poszczególnych elementów są własnościami danego systemu, a relacje to zależności, które łączą te elementy z całością. Systemem może być nie tylko obiekt rzeczywisty, lecz także obiekt abstrakcyjny.⁹²

Próbie tworzenia takiej teorii podjął również M. Mesarović definiując system jako zbiór relacji między istniejącymi cechami systemu. Przy opisie badanego systemu proponuje on wykorzystanie metody formalizacji, w której można wyróżnić następujące etapy: należy określić werbalną definicję systemu w odpowiednich dziedzinach zastosowań, a następnie przyjęte pojęcie zdefiniować

⁸⁵ M. Jaros, S. Pabis, tamże..., s. 5–16.

⁸⁶ J. Dietrych, *System i konstrukcja*, Warszawa, WNT, 1985, s. 58–70.

⁸⁷ E. Pająk, *Zarządzanie produkcją. Produkt, technologia, organizacja*, Warszawa, PWN, 2006, s. 7–21.

⁸⁸ A. Gołąbek, *Metodyka badań i oceny niezawodności maszyn w ujęciu systemowym*, [W:] Materiały XXI Zimowej Szkoły Niezawodności. Kształtowanie i obliczanie niezawodności obiektów technicznych w procesie ich projektowania, Szczyrk, 1993, s. 93–110.

⁸⁹ A. Gołąbek, tenże..., s. 93–110.

⁹⁰ R. Zdanowicz, *Modelowanie i symulacja procesów wytwarzania*, Gliwice, WPS, 2007, s. 19.

⁹¹ E. Pająk, tenże..., s. 7–21.

⁹² E. Michłowicz, *Logistyka a teoria systemów*, [W:] Automatyka, tom 13, z. 2, 2009, s. 453–462.

aksjomatycznie za pomocą minimalnej struktury matematycznej. Umożliwia to badanie złożonych systemów jako wzajemnie połączonych podsystemów.⁹³

System ogólny S to relacja określona jako iloczyn kartezjański na zbiorach abstrakcyjnych

$$S \subset \times \{V_i : i \in I\},$$

przy czym:

$\times$ – iloczyn kartezjański,

I – zbiór indeksów.

Jeżeli I jest zbiorem skończonym, wtedy zapis systemu może być prostszy:

$$S \subset V_1 \times V_2 \times \dots \times V_i \times \dots \times V_n,$$

V_i – obiekty systemu,

$\times$ – iloczyn kartezjański.

Obiekt przedstawia cechę bądź charakterystykę systemu opisaną w takich samych kategoriach jak badany system. Mesarović proponuje następujące metody opisu:

- metoda opisu „wejście-wyjście” (opis terminalny, przyczynowy),
- metoda opisu „dążenie do celu” (opis podejmowania decyzji, teleologiczny).⁹⁴

Według G.J. Klira pojęcie systemu oznacza układ elementów połączonych ze sobą w ten sposób, że tworzą całość. Obiekt techniczny jest systemem, w którym układ elementów można rozpatrywać „od zewnątrz” i „od wewnątrz”. „Od zewnątrz” rozumiany jest jako całość, a „od wewnątrz” traktowany jest jako zbiór (podzespołów, elementów).

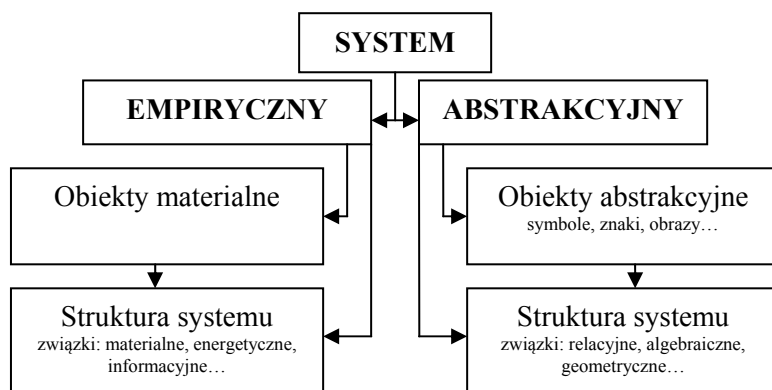
Uważa się, że system stanowi parę uporządkowaną $\langle M, S \rangle$, w której skład wchodzi zbiór M i ciąg S określany jako relacja R . M jest zbiorem elementów, natomiast S strukturą systemu. Zespół obiektów A może wejść w skład systemu, gdy będzie zbiorem elementów E , czyli każdemu obiektowi zostanie przyporządkowana pewna cecha o charakterze systemotwórczym. Zbiór wtedy stanie się systemem, gdy zostanie określona w nim relacja R . I tak zgodnie z powyższą definicją system to para uporządkowana $\langle A, R \rangle$, a nie zbiór $\{A, R\}$. Z tego wynika, że relacja R , nazywana strukturą systemu, nie stanowi zbioru relacji pomiędzy elementami $\{R_1, R_2\}$, lecz jest ciągiem relacji $\langle R_1, R_2 \rangle$.⁹⁵

Biorąc pod uwagę rodzaje obiektów można podzielić systemy na empiryczne i abstrakcyjne. Poniższy schemat na rys. 17 obrazuje podział systemów empirycznych i abstrakcyjnych ze wskazaniem jaki rodzaj związków może łączyć te obiekty.

⁹³ T. Nowakowski, *Niezawodność systemów logistycznych*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011, s. 36–43.

⁹⁴ E. Michłowicz, tamże..., s. 453–462.

⁹⁵ Z. Matuszak, *Wybrane zagadnienia dotyczące opisu systemów technicznych*, [W:] Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, nr 5 (77), 2005, s. 371–382.



Rys. 17. Podział systemów ze względu na rodzaj obiektów i związków między obiektami

Źródło: M. Jaros, S. Pabis, tenże..., s. 14.

W zależności od potrzeb nawet wielki system, na który składa się wiele obiektów i relacji (własności środków technicznych) między nimi, można traktować jak obiekt w innym większym systemie (w ten sposób wyodrębniony system jest podsystemem). Zatem należy wiedzieć, że związki analizowanego systemu z innymi systemami wraz z ich obiektami tworzą otoczenie. Szczególną uwagę należy zwrócić na charakter tych wzajemnych relacji, które mogą być zdeterminowane lub stochastyczne (przypadkowe). Zależności stochastyczne są powszechne w rolnictwie, gdzie często nie znane są rozkłady prawdopodobieństw tych zależności i dlatego trudno precyzyjnie prognozować ich skutki.⁹⁶

S. Ziemia, W. Jarominek, R. Staniszewski w *Problemach teorii systemów* dzielą wszystkie systemy na dwie kategorie:

- konfiguracyjne (*pattera systema*): porządkujące, relacyjne, statystyczne;
- działaniowe (*acting systema*): operacyjne, przetwarzające, procesowe, dynamiczne.

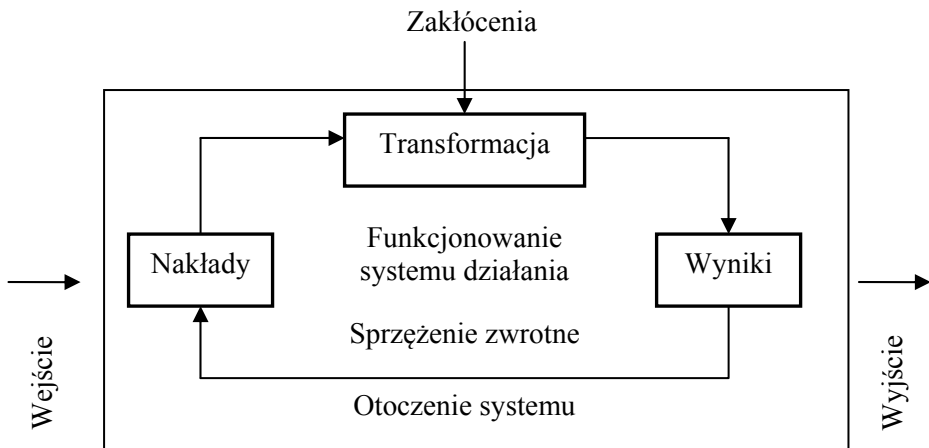
Analiza i synteza systemów działaniowych, w szczególności technicznych, pomaga wyróżnić następujące rodzaje systemów specjalnych:

- 1) System procesowy *P*, który umożliwia zdolność systemu do funkcjonowania i realizacji zadanych celów.
- 2) System sterowania *C*, który kieruje i koordynuje działalność pozostałych podsystemów dla realizacji celów całego systemu.
- 3) System informacyjny *J*, który przetwarza strumień informacji w obrębie systemu, jak i pochodzących z zewnątrz systemu, zgodnie z działaniem pozostałych systemów specjalnych.

⁹⁶ M. Jaros, S. Pabis, tamże..., s. 5–16.

- 4) System logistyczny L , utrzymujący prawidłowe funkcjonowanie pozostałych systemów specjalnych.⁹⁷

System działania przedstawia rys. 18, gdzie wejściem do systemu są nakłady w postaci zasobów informacyjnych, ludzkich, finansowych, rzeczowych. Poprzez transformację procesów rolniczych, przemysłowych, usługowych nakłady są przetworzone w wyniki, w skład których wchodzi: wyroby, usługi, zyski, straty. Wyniki są wyjściem z systemu, które wpływa na otoczenie. Z kolei otoczenie działa na system sprzężeniem zwrotnym, skierowanym na wejścia systemu.⁹⁸



Rys. 18. Schemat funkcjonowania systemu działania

Źródło: opracowanie własne na podstawie S. Niziński, *Eksploatacja obiektów technicznych*, Radom, ITE, 2002, s. 186–187.

Hierarchiczny podział informacji dotyczących parametrów systemu przedstawiono w tab. 25.

⁹⁷ E. Michłowicz, *Logistyka a teoria systemów*, [W:] Automatyka, tom13, z.2, 2009, s. 453–462.

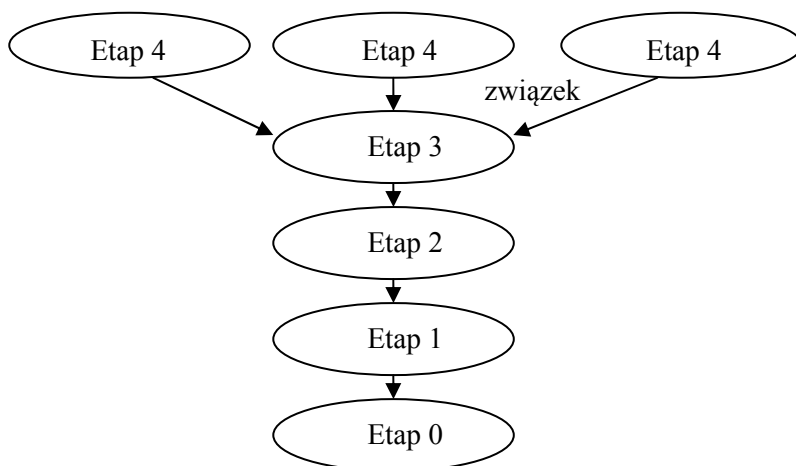
⁹⁸ S. Niziński, tamże..., s. 186–187.

Tab. 25. Hierarchia wiedzy o systemie

Etap	Nazwa pojęcia	Co wiemy na tym etapie
0	Szkielet obserwacji	Wejście do systemu, wyjście z systemu, parametry mierzalne, metody opisu obserwacji, pomiaru, czasu
1	Zachowanie I/O	Dane zależne od czasu składające się z par wejście/wyjście
2	Funkcje I/O	Informacja na temat warunków początkowych na wejściu prowadząca do zaistnienia określonego skutku na wyjściu
3	Stan przejścia	Skuteczność zmiany stanu na wejściu, kolejny stan po zadziałaniu bodźca, stan na wyjściu
4	Wewnętrzne komórki	Znajomość odpowiednich parametrów systemu i ich wzajemnych relacji. Parametry mogą być określone na niższych poziomach lub same mogą stanowić struktury systemów

Źródło: opracowanie własne na podstawie R. Zdanowicz, *Modelowanie i symulacja procesów wytwarzania*, Gliwice, WPS, 2007, s. 27–28.

Związki pomiędzy etapami opisu hierarchii systemu pokazano poniżej.

**Rys. 19. Związki pomiędzy etapami opisu hierarchii systemu**

Źródło: opracowanie własne na podstawie R. Zdanowicz, tamże..., s. 27–28.

W dobie rozwoju technologii, potrzeb demograficznych oraz wyczerpywania się nieodnawialnych zasobów szczególnego znaczenia nabiera potrzeba innowacyjności w rozwijaniu systemów technicznych.⁹⁹ Pojęcie systemu technicznego

⁹⁹ J. Lúnarski, *O problemach ewolucji systemów technicznych*, [W:] Technologia i Automatyzacja Montażu, nr 1, 2011, s. 6–7.

J. Dietrych interpretuje jako własność układu sprzężonych środków technicznych umożliwiających przekształcenia masy, energii i informacji.¹⁰⁰ Nieco szerzej w literaturze przedmiotu system techniczny jest opisywany jako skomplikowane, złożone i zorganizowane układy elementów, podzespołów i zespołów konstrukcyjnych skierowanych na wykonanie określonego zadania. System czyli całość to więcej niż suma elementów, gdyż występują w nim relacje i związki na wielu poziomach z siecią powiązań formalnych oraz podmiotowych.¹⁰¹ Na podstawie analizy patentowej oraz danych dotyczących rozwoju systemów technicznych wynalazca H. Altszuller opracował podstawowe linie rozwoju obiektów technicznych (np. wprowadzanie i usuwanie dodatkowych elementów, zamiana i rozdzielanie elementów, zmiana struktury, zmiana kształtu lub stanu powierzchni, dynamizacja działań, ulepszanie sterowań oraz synchronizacja działań). Teoria ta wykorzystuje założenie o ewolucyjnym rozwoju systemów technicznych oraz umożliwia opracowanie „drzewa ewolucyjnego” rozwoju określonego typu systemu technicznego.¹⁰² Współczesna konstrukcja obiektów technicznych (OT) jest projektowana pod względem zakładanych celów, jak i parametrów eksploatacyjnych. Cechuje ją odpowiedni zestaw własności i właściwości. Aby spełnić wymagania stawiane projektowanej konstrukcji konieczne jest zastosowanie odpowiedniej procedury optymalizacyjnej. Już na etapie projektowania systemu technicznego należy opracować modele eksploatacji np. strukturalny, fizyczny, matematyczny, informatyczny, diagnostyczny.¹⁰³

Posługiwanie się pojęciem systemu, jako własności układu działającego, uzależnienia od samego początku, od środków technicznych tj. układów materialnych. Układ wytwórczy korzysta z różnych środków technicznych tj. w tym wypadku maszyn przetwórczych i pomieszczeń. Działanie środków technicznych można rozumieć w ramach wyodrębnionych współsystemów: systemów informacyjnych, energetycznych, masowych, w których zachodzą różne kombinacje (synergia) np. relacje przemieszczania, przetwarzania, przekształcania, sprzężania.¹⁰⁴

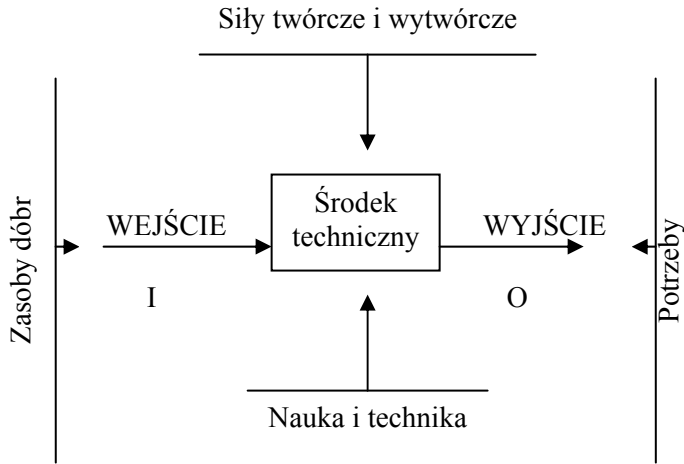
¹⁰⁰ J. Dietrych, tenże..., s. 58–85.

¹⁰¹ K. Kustroń, *Eksploatacja złożonych systemów technicznych*, [W:] Systems, vol. 9, special issue 2/1, 2004, s. 535–540.

¹⁰² J. Łunarski, *O problemach ewolucji systemów technicznych*, [W:] Technologia i Automatyzacja Montażu, nr 1, 2011, s. 6–7.

¹⁰³ K. Kustroń, tamże..., s. 535–540.

¹⁰⁴ J. Dietrych, tenże..., s. 58–85.

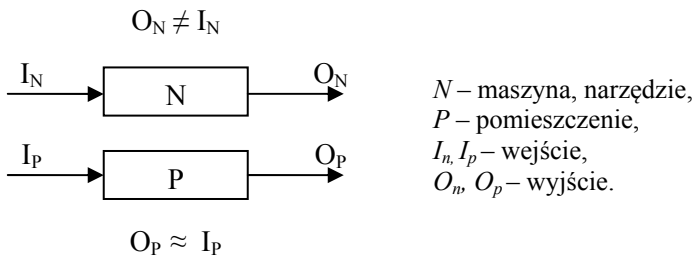


Rys. 20. Właściwości środka technicznego

Źródło: J. Dietrych, tamże..., s. 39–47.

Wejście I wymaga zasobów materialnych, surowcowych i energetycznych, a na realizację środka technicznego wpływ mają czynniki twórcze, wytwórcze, wiedza praktyczna i teoretyczna.

Masa energia, informacja poddawane są działaniu środków technicznych (rys. 21).

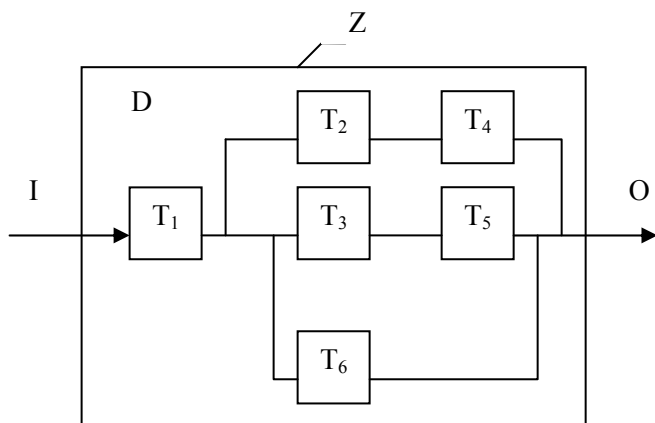


Rys. 21. Podstawowe rozróżnianie środków technicznych pod względem działania

Źródło: J. Dietrych, tamże..., s. 39–47.

Na rys. 21 w pierwszym przypadku widać przekształcenie, w którym wyjście O_n różni się znacząco od wejścia I_n . Natomiast w drugim przypadku działanie pomieszczenia polega na tym, że wyjście O_p nie różni się znacząco od wejścia I_p , gdyż istota pomieszczenia ulega ograniczaniu stopni swobody czynnika znajdującego się w pomieszczeniu.

Istniejące wytwórnice, przetwórnice, zakłady produkcyjne, urządzenia usługowe, które tworzą tzw. megaukłady, które są układami złożonymi (zespoły środków technicznych współdziałające ze względu na układ jako na całość).



Rys. 22. Model blokowy megaukładu technicznego

Źródło: J. Dietrych, *System i konstrukcja*, Warszawa, WNT, 1985, s. 39–47.

Rozpatrywanie twórcze lub badawcze środka technicznego wymaga uwzględnienia megaukładu, w którym ten środek powinien występować lub występuje. Umożliwia to wówczas zidentyfikowanie znaczenia tego środka. Rysunek 22 przedstawia megaukład, którego właściwością jest działanie D , które przy zachowaniu warunków zewnętrznych Z osiąga wyjście O przy uprzednim wejściu I . To działanie jest możliwe dzięki współdziałaniu sprzężonych środków technicznych $T_1 \div T_6$. Identyfikacja własności środka technicznego polega nie tylko na określeniu jakie właściwości powinien on mieć, lecz także na uwzględnieniu innych jego właściwości mogących ujawnić się w różnych przypuszczalnych okolicznościach np. zakłócenia, braki, ubytki.¹⁰⁵

W obiektach produkcyjnych wyodrębnić można jeden lub wiele systemów produkcyjnych. Literatura przedmiotu przedstawia różne ujęcia systemów produkcyjnych. I tak, stanowisko I. Durlika opiera się na stwierdzeniu, że „system produkcyjny należy rozumieć jako celowo zaprojektowany i zorganizowany układ materialny, energetyczny i informacyjny eksploatowany przez człowieka i służący produkowaniu określonych produktów (wytworów lub usług) w celu zaspokajania różnorodnych potrzeb konsumentów”.¹⁰⁶

¹⁰⁵ J. Dietrych, tamże..., s. 39–47.

¹⁰⁶ I. Durlik, *Inżynieria Zarządzania: strategia i projektowanie systemów produkcyjnych, cz. I.*, Warszawa, Wydawnictwo Placet, 2007, s. 31–50.

Mając to na uwadze, przywołajmy definicję systemu produkcyjnego F. Milkiewicza, według którego system produkcyjny jest złożonym obiektem sterowania skierowanym na przetwarzanie surowców lub półproduktów w określone produkty. Takie przetwarzanie na produkty realizowane jest w ramach działalności produkcyjnej przez procesy produkcyjne, które odbywają się w więcej niż jednym etapie (aż do etapu końcowego: produkty). Sterowanie systemem produkcyjnym SP obejmuje sterowanie takimi rodzajami działalności: działalność produkcyjna, zbytu wyrobów, zaopatrzeniowa, renowacyjna, inwestycyjna i działalność pomocnicza.¹⁰⁷ R. Jackowicz, S. Lis określają system produkcyjny jako statyczne i dynamiczne kombinacje zasobów transformujących zasilenia wejściowe w stan wyjściowy, które mogą być w postaci materialnej lub informacyjnej.¹⁰⁸

Aby transformacja była możliwa potrzebne jest wykorzystanie odpowiednich zasobów takich jak: techniczne środki produkcji (infrastruktura techniczna, budynki, wyposażenie technologiczne, środki zagospodarowania odpadów), przedmioty pracy (surowce, materiały), czynniki energetyczne, ludzkie, informacyjne oraz kapitał, która jest możliwa w wyniku realizacji różnych procesów stanowiących ciągi następujących po sobie działań.

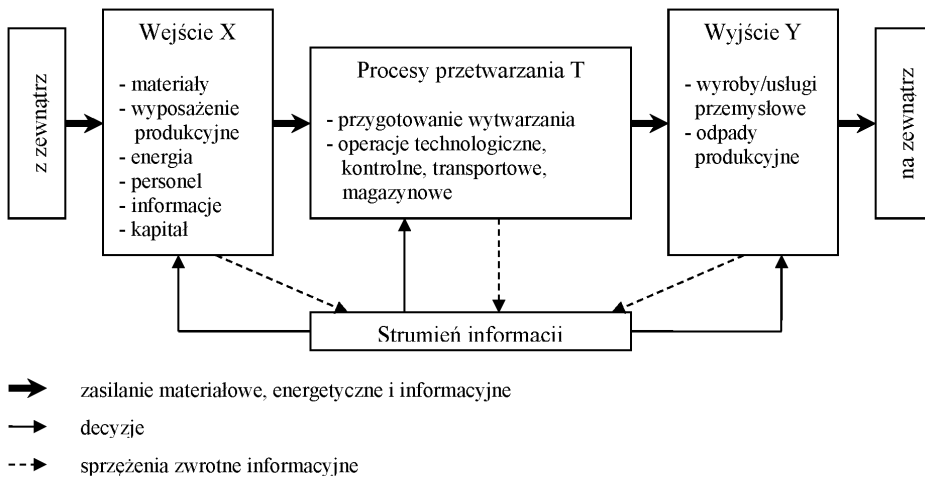
Na system produkcyjny (rys. 23) składają się takie elementy jak: wektor wejścia X (czynniki produkcji), wektor wyjścia Y (wyroby, usługi, odpady, zanieczyszczenia), procesy przetwarzania wektora wejścia w wektor wyjścia T (proces produkcyjny), proces zarządzania systemem, sprzężenia materialne, energetyczne, informacyjne (między elementami składowymi). Trzy pierwsze wymienione elementy nazywane są podsystemem przetwarzania lub produkcji. W systemie produkcyjnym można wyróżnić następujące podsystemy:

- techniczny (zbiór powiązanych ze sobą środków produkcji),
- technologiczny (struktury przestrzenne wraz z procesami przekształcenia czynników produkcji),
- ekonomiczny (zbiór procesów kształtujących obraz wartościowy i finansowy),
- zarządzania (przeprowadzane przez ludzi procesy dotyczące funkcji operacyjnych, taktycznych i strategicznych).¹⁰⁹

¹⁰⁷ F. Milkiewicz, *Sterowanie systemami produkcyjnymi*, Gdańsk, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2004, s. 11–17.

¹⁰⁸ R. Jackowicz, S. Lis, *Podstawy projektowania struktur przedsiębiorstw przemysłowych*, Warszawa, PWN, 1987, s. 12; M. Roszak, *Chosen aspects of evaluation of productive processes on the example of productive chains of gear*, [W:] *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 14 (1–2), 2006, p. 184–189.

¹⁰⁹ W. Kubiński, *Inżynieria i technologie produkcji*, Kraków, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, 2008, s. 249–266; I. Durlik, *Inżynieria Zarządzania: strategia i projektowanie systemów produkcyjnych, cz. I*, Warszawa, Wydawnictwo Placet, 2007, s. 31–50; E. Pająk, *Zarządzanie produkcją. Produkt, technologia, organizacja*, Warszawa, PWN, 2006, s. 7–21.



Rys. 23. Uogólniony model systemu produkcyjnego

Źródło: opracowanie własne na podstawie I. Durlík, tamże..., s. 31–51.

Należy wiedzieć, że każdy z tych elementów może stanowić wyodrębniony system w zależności od celów i struktury produkowanych wyrobów. Elementy te są ze sobą powiązane. Zsynchronizowanie ich w czasie, zapewnienie środków technicznych, minimalizacja pracochłonności umożliwią transformację surowców w gotowy wyrób. Inwestycja musi brać pod uwagę problematykę związaną z doбором maszyn i urządzeń, odpadami produkcyjnymi, układem relacji, zapotrzebowaniem rynku, sezonowością, dostępnością surowców i materiałów, zdolnością produkcyjną. Wymaga to zużycia różnych czynników energetycznych np. energii elektrycznej, gazów technicznych, sprężonego powietrza, paliw ciekłych, gazowych i stałych. Proces wytwarzania musi być stabilny i dostosowany do zróżnicowanych potrzeb nabywców.¹¹⁰ Projektowanie systemów produkcyjnych odbywa się poprzez kształtowanie procesów i dostosowaniu ich do wymagań rynkowych. Obejmuje ono szereg czynności (analiza, synteza, ocena, decyzja) w celu stworzenia optymalnego systemu. Zapewnienie skuteczności projektowania wymaga rozpatrywania składowych systemu. Taki uproszczony model systemu produkcyjnego posiada dwa składniki: produkcję i zarządzanie. Produkcja opiera się na technicznych aspektach wytwarzania, zaś zarządzanie koncentruje się m.in. na: określaniu optymalnej wielkości partii, gospodarce materiałowej, planowaniu, harmonogramowaniu. Ponadto, powinny być one weryfikowane według podstawowych kryteriów odwołujących się do czasu wykonywania zadań

¹¹⁰ R. Domański, N. Pawlak, *Wytłaczne projektowania i stosowania szczupłych systemów produkcyjnych*, [W:] Logistyka, nr 1, 2007, s. 1–9; I. Durlík, *Inżynieria Zarządzania: strategia i projektowanie systemów produkcyjnych, cz. I.*, Warszawa, Wydawnictwo Placet, 2007, s. 31–51.

produkcyjnych oraz ich wielkości, ilości, jakości, miejsca lokalizacji wraz z wielkością ponoszonych nakładów.¹¹¹ Osiągnięcie wszystkich wymagań w oczekiwanym wymiarze oznacza zakończenie procesu. W definicji o procesie sformułowanej przez E. Pająka mówi się, że „proces można określić jako kolejną zmianę stanu w cyklu następujących po sobie działań”.¹¹² Stanowisko M. Hammera wyjaśnia proces jako zbiór czynności potrzebujących wkładu na wejściu i dających rezultat na wyjściu.¹¹³ Z kolei Z. Tomaszewski opisuje proces jako system działań, w którym zasoby są używane do transformacji stanu wejściowego w stan wyjściowy.¹¹⁴ Natomiast R. Zdanowicz twierdzi, że proces polega na zmianie stanu elementów w czasie.¹¹⁵

Głównymi charakterystykami systemu są: struktura i proces funkcjonowania. Pojęcie struktury produkcyjnej wg J. Boszko należy rozumieć jako sposób podziału procesu produkcyjnego między jednostkami produkcyjnymi czyli podmiotami procesu produkcji łącznie ze związkami wewnętrznymi i zewnętrznymi, które wynikają ze współpracy stanowisk roboczych i jednostek produkcyjnych wyższego rzędu (gniazd, linii, oddziałów) w zakresie procesu produkcyjnego zakładu.¹¹⁶ Z kolei S. Lis strukturę określa jako układ jednostek produkcyjnych i formy ich wewnętrznych powiązań kooperacyjnych w procesie produkcji.¹¹⁷

Z powyższych definicji wynika, że elementami składowymi struktury produkcyjnej są złożone jednostki produkcyjne (*JP*) o różnych stopniach złożoności (0 – stanowisko robocze, *I* – gniazdo, linia, *II* – oddział, *III* – wydział). Kształtowanie struktury polega na łączeniu stanowisk roboczych powiązanych procesem technologicznym wraz z optymalizacją tych powiązań lub jako grupowanie przedmiotów przewidzianych do wytworzenia w jednej jednostce produkcyjnej. Pojęcie struktury produkcyjnej można określić jako powiązania elementów systemu produkcyjnego w znaczeniu statycznym i dynamicznym. Elementy systemu produkcyjnego to stanowiska robocze, a relacje czyli powiązania to związki między elementami, które wynikają z powiązań wyrobów procesami technologicznymi.¹¹⁸

¹¹¹ A. Sobiś, *Projektowanie systemów produkcyjnych (jednego z elementów systemów logistycznych)*, [W:] Systemy logistyczne, nr 4, 2008, s. 1–6.

¹¹² E. Pająk, *Zarządzanie produkcją. Produkt, technologia, organizacja*, Warszawa, PWN, 2006, s. 85.

¹¹³ M. Hammer, J. Champy, *Reengineering w przedsiębiorstwie*, Warszawa, Neumann Management Institute, 1996, s. 49.

¹¹⁴ Z. Tomaszewski, *Wprowadzenie do techniki*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2002 s. 9.

¹¹⁵ R. Zdanowicz, tamże..., s. 9–14.

¹¹⁶ J. Boszko, *Struktura organizacyjna przedsiębiorstwa i drogi jej optymalizacji*, Warszawa, WNT, 1973, s. 20.

¹¹⁷ S. Lis, *Organizacja i ekonomika procesów produkcyjnych w przemyśle maszynowym*, Warszawa, PWN, 1984, s. 8.

¹¹⁸ J. Mazurczak, *Projektowanie struktur systemów produkcyjnych*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2002, s. 7–17; A. Garcia, A. Poznyak, I. Chaires, *Differential Neural*

Inaczej struktura to stały w czasie zbiór elementów lub komponentów uwzględniających podsystemy i metasystemy oraz ich wzajemne związki.¹¹⁹

Struktura systemu SS jest wewnętrznie uporządkowana z punktu widzenia zawartych podsystemów. Można to opisać następująco:

$$SS = \langle E, W, R \rangle$$

jako zbiór wyróżnionych podsystemów $E = \{E_i\}$, $i = 1, 2, \dots$ uwzględniających własności podsystemów $W = \{W_i\}$, $i = 1, 2, \dots$ w których skład wchodzi cechy mierzalne i niemierzalne oraz zbiór relacji $R = \{R_i\}$, $i = 1, 2, \dots$ istniejących między podsystemami i własnościami podsystemów. Jest to organizacja hierarchiczna, która odwzorowuje rozmieszczenie podsystemów z ich własnościami oraz sposoby łączenia tych podsystemów. Ze względu na cechy systemu i sposób ich rozpoznawania zbiór podsystemów jest dekomponowany na podsystemy. Jednocześnie z dekompozycją podsystemów zachodzi dekompozycja ich własności i relacji na bardziej szczegółowe w ten sposób, że na n -tym poziomie wyodrębnione zostają ze zbiorów E , W , R podzbiory podsystemów E_n ich własności W_n i relacji R_n :

$$SS_n = \langle E_n, W_n, R_n \rangle$$

Biorąc pod uwagę określone kryterium może być badany system bądź też tylko jego część tzw. przekrój zbudowany z wyselekcjonowanych podsystemów ich własności i relacji.¹²⁰

W. Jodłowski i E. Michłowicz proponują ujęcie struktury systemu produkcyjnego w postaci czwórki:

$$S = \langle X, C, Q, R \rangle,$$

gdzie:

R – zbiór relacji między cechami obiektów,

X – zbiór obiektów systemu,

$$X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_j, \dots, x_n\},$$

n – liczba obiektów systemu,

C – zbiór cech obiektów; zbiór cech j -tego obiektu można przedstawić przy pomocy wektora C^j :

Networks Observers: development, stability analysis and implementation, [W:] Systems, Structure and Control, Vienna, red. P. Husek, In-Teh, 2008, s. 61–64.

¹¹⁹ J. Stamirowski, *Przegląd możliwości zastosowania notacji graficznych w modelowaniu systemów technicznych*, [W:] Technologia i automatyzacja montażu, nr 1, 2005, s. 14–19.

¹²⁰ Z. Matuszak, *Wybrane zagadnienia dotyczące opisu systemów technicznych*, [W:] Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, nr 5 (77), 2005, s. 371–382.

$$C^j = [C_1^j, \dots, C_k^j, \dots, C_k^j]^T,$$

którego elementy zawierają następujące cechy:

- zdolność produkcyjna,
- zapotrzebowanie materiałów z innych obiektów i otoczenia koniecznych do wyprodukowania jednostki produktu,
- zapotrzebowanie nośników energii koniecznych do wytworzenia jednostki produktu,
- zajmowana powierzchnia,
- koszty jednostkowe i inne.

T – macierz transponowana,

Q – zbiór relacji między obiektami systemu i otoczenia.

Główne relacje mają postać sprzężeń strumieni materiałów, które można przedstawić za pomocą macierzy:

$$Q = [q_{ij}]_{(n+m) \times (m+n)},$$

gdzie:

q_{ij} – liczba dostarczonego materiału z obiektu i do obiektu j ,

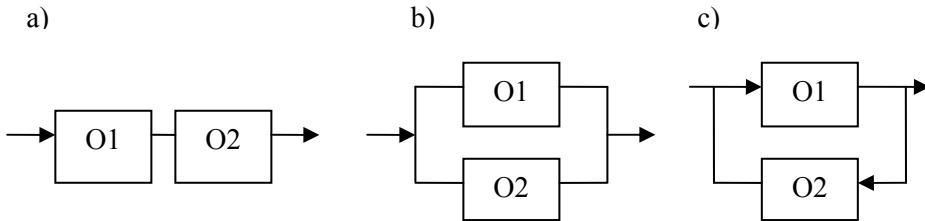
m – liczba obiektów otoczenia.

Rozpatrując system w takiej postaci można zauważyć, że jego struktura może zależeć od zmian wartości wielkości wyjściowych i wejściowych oraz zdarzeń występujących w samej strukturze (np. zużycie lub awaria obiektu czy klęska żywiołowa). Można wyróżnić kilka typowych zmian wielkości wyjściowych i wejściowych. Do parametrów wyjściowych zalicza się: skalę produkcji za względu na zapotrzebowanie wytwarzanych produktów, zmianę wymagań parametrów produktów. Natomiast do wejściowych: zapotrzebowanie na surowce ze względu na skalę produkcji, koszty produkcji, opłaty, przepisy dotyczące ochrony środowiska. Osiągnięcie ekstremum funkcji określającej koszty inwestycyjne i eksploatacyjne w rozpatrywanym okresie, wymaga zaplanowania odpowiedniej struktury systemu i jej dalszych zmian. Taka zmiana struktury systemu może polegać na:

- wzroście (spadku) liczby obiektów n ,
- zmianie wartości cech C^j poszczególnych obiektów (np. modernizacja obiektu),
- zmianie liczby sprzężeń (np. korzystanie z surowców wtórnych, czyli dodanie kolejnego sprzężenia materiałowego),

- zmianie wartości poszczególnych sprzężeń (np. korzystanie z surowców wtórnych przy niezmienionej skali produkcji oznacza obniżenie strumienia surowców pierwotnych).¹²¹

Taki zbiór wzajemnie powiązanych elementów można przedstawić w różnych konfiguracjach: szeregowych, równoległych, mieszanych (rys. 24).



Rys. 24. Podstawowe struktury stosowane w systemach produkcyjnych

Źródło: R. Zdanowicz, *Modelowanie i symulacja procesów wytwarzania*, Gliwice, WPŚ, 2007, s. 19–21.

W połączeniu szeregowym (rys. 24a) wyjście elementu poprzedniego jest jednocześnie wejściem elementu następnego. W takim systemie elementy połączone są kolejno jeden za drugim tak jak kolejne operacje wchodzące w skład procesu technologicznego. Zasoby dostarczane są do elementów jedną ścieżką. W systemie równoległym (rys. 24b) wejście i wyjście elementów są wspólne. Część przepływa wielokrotnie tą samą ścieżką. Stosowane są także struktury ze sprzężeniem zwrotnym (rys. 24c), w której część strumienia wyjściowego elementu *O1* podawana jest powtórnie na wejście elementu *O2*. Rzeczywiste konfiguracje tych struktur mają przeważnie strukturę złożoną, która jest kombinacją wszystkich trzech typów połączeń elementów.¹²²

Strukturę procesu produkcyjnego można rozpatrywać w skali makro- i mikroorganizacyjnej. Ma ona budowę wewnętrzną, w której skład wchodzi elementy składowe i relacje powiązań między tymi elementami. Strukturę procesu produkcyjnego w skali makroorganizacyjnej charakteryzuje syntetyczne podejście do procesów złożonych wieloelementowych wyrobów przemysłowych. Natomiast w skali mikroorganizacyjnej cechą charakterystyczną jest dokładne prezentowanie i rozpatrywanie wszystkich operacji procesu produkcyjnego (w skali makro ogranicza się tylko do rodzaju procesów i faz produkcyjnych).¹²³

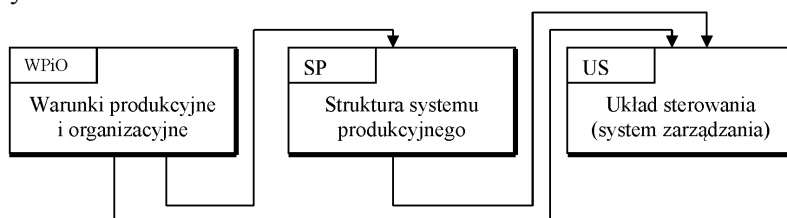
¹²¹ W. Jodłowski, E. Michłowicz, *Problem czasu w strukturach systemów produkcyjnych*, [W:] *Automatyka*, tom 13, z. 2, 2009, s. 307–313.

¹²² R. Zdanowicz, *tamże...*, s. 19–21.

¹²³ I. Durlik, *Inżynieria Zarządzania: strategia i projektowanie systemów produkcyjnych, cz. I.*, Warszawa, Wydawnictwo Placet, 2007, s. 68–71.

Jest więc oczywiste, że projektowanie struktury procesu produkcyjnego (który obejmuje wszystkie fazy przetwarzania surowców, materiałów, półwyrobów w wyroby końcowe oraz procesy technologiczne, pomocnicze służące nadawaniu wyrobom określonych cech) jest działaniem wieloetapowym.¹²⁴ Ze względu na inwestycję i czas eksploatacji systemów produkcyjnych poszukuje się najlepszej struktury systemu. Ze względu na dużą zmienność konieczne jest racjonalne podejście: wybór optymalnej struktury, dla krótkiego (kilkuletniego) horyzontu z możliwością przewidywalnych zmian; zastosowanie takiego rozwiązania technicznego, które umożliwi proste i niezbyt kosztowne dopasowanie struktury systemu do zmieniających się warunków tj. terenu, hal produkcyjnych, infrastruktury zaopatrzeniowej, urządzeń technologicznych.¹²⁵

Projektowanie struktury produkcyjnej podejmuje się przeważnie w takich przypadkach, gdy planowane jest powstanie zakładu lub, gdy konieczna jest modernizacja struktury produkcyjnej istniejącego już zakładu. W skład projektowania wchodzi: projekt struktury produkcyjnej, projekt struktury produkcyjno-administracyjnej, projekt przestrzennej, lokalizacyjnej struktury systemu.¹²⁶ J. Boszko proces kształtowania struktury produkcyjnej umieszcza w ogólnym algorytmie projektowania struktury organizacyjnej przedsiębiorstwa. Takie metodyczne podejście do budowy algorytmów projektowania struktury przedstawia rys. 25.



Rys. 25. Podejście metodyczne do budowy algorytmów projektowania struktury organizacyjnej przedsiębiorstwa

Źródło: J. Boszko, *Uogólniony model tworzenia efektywnych struktur podmiotowych w przedsiębiorstwach budowy maszyn*, [W:] Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Organizacja i Zarządzanie, nr 14, 1988, s. 231.

Z rys. 25 wynika, że proces tworzenia struktury jest na pierwszym planie w projektowaniu organizacji przedsiębiorstwa przemysłowego. Głównym jego celem jest ukształtowanie jednostek produkcyjnych oraz podział procesu pro-

¹²⁴ O. Ciszak, *Komputerowo wspomagane modelowanie i symulacja procesów produkcyjnych*, [W:] Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, nr 6, 2007, s. 39–45.

¹²⁵ W. Jodłowski, E. Michłowicz, *Problem czasu w strukturach systemów produkcyjnych*, [W:] Automatyka, tom 13, z. 2, 2009, s. 307–313.

¹²⁶ J. Mazurczak, I. Gania, *Miary warunków organizowania systemów produkcyjnych*, [W:] Logistyka, nr 2, 2009, s. 1–11; W. Kubiński, *Inżynieria i technologie produkcji*, Kraków, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, 2008, s. 249–274.

dukcyjnego pomiędzy te jednostki w taki sposób, aby można było zapewnić jak największą efektywność. A zatem tworzenie struktury produkcyjnej jest problemem optymalizacyjnym. Należy kierować się następującymi kryteriami:

- projektowymi (optymalizacyjnymi) np. zdolność obciążeniowa detali i operacji, podobieństwo asortymentu,
- kryteriami oceny (w końcowej fazie procesu) np. ocena opracowanych rozwiązań, narzędzia do rozwiązań wariantowych.

Kryterium optymalizacji (funkcją celu) jest funkcja wielowymiarowa czyli mamy do czynienia z wielokryterialną optymalizacją struktury produkcyjnej. Przyjęto, że kryterium stanowić może funkcja:

$$f = (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6)$$

gdzie:

- f_1 – poziom zapasu robót w toku,
- f_2 – średnia długość cyklu wyrobu,
- f_3 – średnia długość cyklu wyrobu,
- f_4 – poziom wykorzystania czasu pracy robotników,
- f_5 – wielkość przewozów między stanowiskami,
- f_6 – koszty stanowiskowe.

Optymalizacja wydzielania jednostki produkcyjnej (JP_I – I stopnia złożoności np. oddział, wydział) może być zdefiniowana jako problem wielokryterialny o funkcji celu:¹²⁷

$$g = (g_1, g_2, g_3, g_4)$$

gdzie:

- g_1 – liczba detali przyporządkowanych do $JP \Rightarrow \min$,
- g_2 – liczba stanowisk roboczych przyporządkowanych do $JP_I \Rightarrow \min$,
- g_3 – współczynnik obciążenia stanowisk roboczych $JP \Rightarrow \max$,
- g_4 – stopień domknięcia specjalizacji przedmiotowej $JP \Rightarrow \max$.

Takie kształtowanie struktury wpływa na stabilizację produkcji. Stopień stabilizacji zależy od doboru metod i środków w zależności od skali produkcji. Zalicza się do nich: techniczne przygotowanie produkcji, wyposażenie w maszyny i urządzenia, oprzyrządowanie, kwalifikacje, organizacja produkcji, elastyczność, koszty produkcji, stopień automatyzacji, przeznaczenie produktu.¹²⁸

Istotną charakterystyką jest stan systemu, który można przedstawić w postaci wektora parametrów charakteryzujących proces. W zależności od typu elementu oraz stopnia rozbicia procesu na części składowe stan może się zmieniać w spo-

¹²⁷ J. Mazurczak, *Projektowanie struktur systemów produkcyjnych*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2002, s. 7–45.

¹²⁸ J. Mazurczak, I. Gania, *Miary warunków organizowania systemów produkcyjnych*, [W:] Logistyka, nr 2, 2009, s. 1–11; W. Kubiński, *Inżynieria i technologie produkcji*, Kraków, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, 2008, s. 249–274.

sób dyskretny lub ciągły.¹²⁹ J. Stamirowski pojmuje system jako zbiór właściwości lub cech, które w każdym momencie przedstawiają zachowanie się systemu. Dla systemów dyskretnych proces funkcjonowania może przebiegać jako postać kolejnych stanów z odpowiednimi przejściami.¹³⁰ Przy analizie systemów często przewija się pojęcie czasu. Dokładna analiza pokazuje, że czas zalicza się do podstawowych parametrów, które należy brać pod uwagę podczas poszukiwania optymalnej struktury systemu.¹³¹

Dzięki analizie systemowej możliwe jest wyselekcjonowanie czynników mających wpływ na dobór optymalnej technologii oraz skutków jej wdrożenia. Efektem analizy jest budowa modelu systemu dla obszaru przedmiotowego, który zawiera obiekty i związki niezbędne do opisu zadań wymagających rozwiązania.

Taki model odzwierciedla najistotniejsze reguły dotyczące struktury i funkcjonowania systemu zapisane w danym języku. Jego budowa wymaga znajomości analizy systemowej i odpowiednich środków pozwalających zapisywać wyniki tego modelowania. Rosnąca złożoność systemów spowodowała rozwój narzędzi do ich modelowania i realizacji. Zapis wiedzy do budowy modeli może odbywać się metodami opartymi o matematyczne i matematyczno-logiczne środki modelowania oraz przy pomocy grafów uwzględniających daną specyfikę. Złożoność systemów rozpatruje się z punktu widzenia struktury i procesu funkcjonowania.¹³²

2.1. Charakterystyka organizacji produkcji

Gwałtowny rozwój techniki, coraz większa różnorodność wytwarzanych produktów oraz złożoność procesów wytwarzania spowodowały, że dąży się do wypracowania optymalnej metody projektowania systemów produkcyjnych i planowania racjonalnych zasad ich organizacji produkcji.

Podejście procesowe zakłada, że zakład produkcyjny jest całością złożoną z procesów, zaś proces – całością złożoną z kolejnych operacji zmierzających do osiągnięcia założonego celu.¹³³

Jednym z najbardziej istotnych problemów identyfikacji i projektowania systemu produkcyjnego jest odpowiednia jego dekompozycja na części składowe. Produkcja stanowi jedną z głównych działalności systemu produkcyjnego, ponieważ w jej wyniku powstają nowe wartości użytkowe. Z techniczno-organizacyjnego punktu widzenia dotyczy ona przystosowania i przemian surowców

¹²⁹ R. Zdanowicz, *tenże...*, s. 19–21.

¹³⁰ J. Stamirowski, *Przegląd możliwości zastosowania notacji graficznych w modelowaniu systemów technicznych*, [W:] *Technologia i automatyzacja montażu*, nr 1, 2005, s. 14–19.

¹³¹ W. Jodłowski, E. Michłowiec, *Problem czasu w strukturach systemów produkcyjnych*, [W:] *Automatyka*, tom 13, z. 2, 2009, s. 307–313.

¹³² J. Stamirowski, *tamże...*, s. 14–19.

¹³³ J. Brilman, *Nowoczesne koncepcje i metody zarządzania*, Warszawa, PWE, 2002.

i materiałów w wyrób z udziałem środków technicznych i czynnika ludzkiego. Czynniki te wiążą się ściśle ze sobą, a zmiana któregośkolwiek powoduje zmianę innego elementu.

Procesy produkcyjne realizują cele lub zadania systemu produkcyjnego w postaci wyrobów lub usług przekazywanych otoczeniu systemu. Istnienie takich procesów warunkuje ruch tj. przepływ w czasie ludzi, materiałów, informacji, czynników energetycznych.

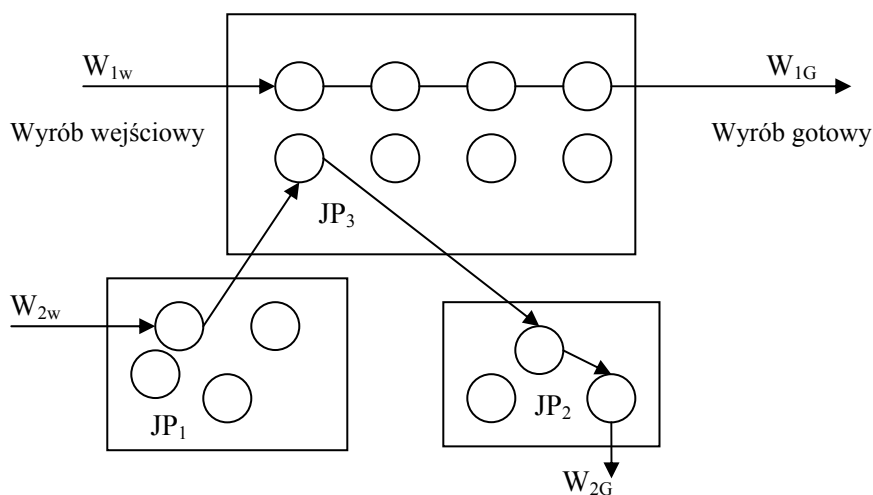
Mianem procesu produkcyjnego określa się ogół czynności, efektem których z surowców powstaje gotowy produkt z określoną wartością użytkową. Biorąc pod uwagę cechy procesów produkcyjnych ogólnie można rozróżnić główne ich rodzaje: wytwórcze, technologiczne, procesy badań, kontroli, transportu, magazynowania, zaopatrzenia.¹³⁴ Według M. Felda proces produkcyjny obejmuje wszystkie działania niezbędne dla wytworzenia wyrobów w zakładzie produkcyjnym.¹³⁵ M. Korzyński proces produkcyjny nazywa całokształtem działań zmierzających do przekształcenia ludzkiej myśli w gotowy wyrób.¹³⁶

Aby móc właściwie zorganizować proces produkcyjny, należy podzielić go według przyjętych kryteriów. Proces produkcyjny można rozpatrywać w odniesieniu do określonego wyrobu, komórki produkcyjnej, a wnioskując jeszcze głębiej wg faz technologicznych. Proces produkcyjny wyrobu może zachodzić w różnych jednostkach produkcyjnych JP (wyrób W_2) lub może być realizowany w całości w jednej jednostce produkcyjnej (wyrób W_1) rys. 26.

¹³⁴ M. Brzeziński, *Organizacja sterowanie produkcją. Projektowanie systemów produkcyjnych i procesów sterowania produkcją*, Warszawa, Wydawnictwo Placet, 2002, s. 17–30.

¹³⁵ M. Feld, *Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn*, Warszawa, WNT, 2009, s. 17–21.

¹³⁶ M. Korzyński, *Podstawy technologii maszyn*, Rzeszów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2002, s. 5–8.



Rys. 26. Proces produkcyjny wyrobu w różnych jednostkach produkcyjnych W_1 , W_2 – wyroby, JP_1 , JP_2 , JP_3 – jednostki produkcyjne, O – stanowiska pracy, -> cykl procesu

Źródło: opracowanie własne na podstawie M. Brzeziński, tamże..., s. 17–30.

Wraz z dokonywaniem wyborów dotyczących wytwarzania kształtowane są rozwiązania w zakresie przepływów informacji, energii, masy, surowców itp. Problemy, których rozwiązanie determinuje użyteczność określonych działań w tym obszarze, można zaprezentować na podstawie cech charakteryzujących proces produkcyjny:

- typ produkcji (zależny od programu produkcyjnego),
- forma przepływów produkcyjnych,
- lokalizacja procesu,
- zaopatrzenie surowcowe.¹³⁷

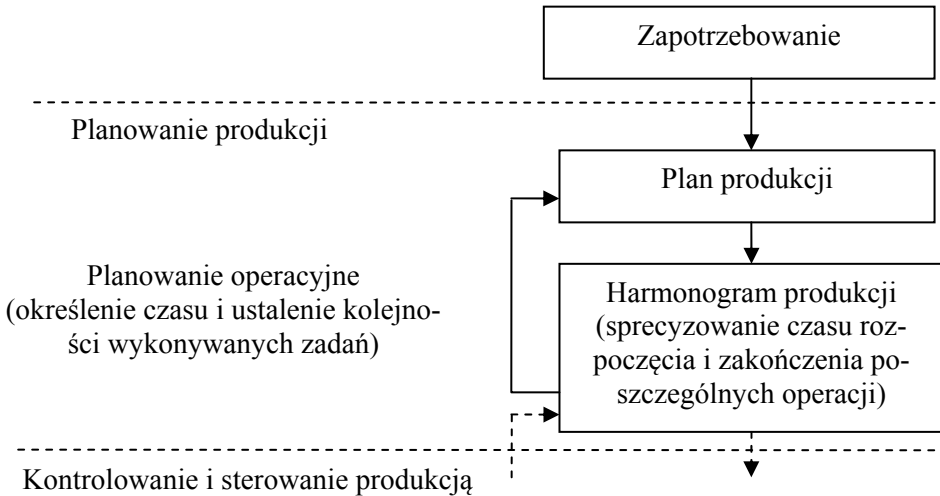
Projektowanie organizacji produkcji, która zajmuje się wszystkimi problemami czasie procesów wytwarzania i jest formą doskonalenia procesu produkcyjnego w systemie produkcyjnym, ściśle powiązane jest z planowaniem wielkości produkcji.¹³⁸ Celem planowania produkcji jest wytyczenie zadań produkcyjnych dla poszczególnych komórek, co daje możliwość na racjonalne wykorzystanie mocy produkcyjnych. Przy planowaniu można wyróżnić: planowanie zadań w czasie (harmonogramowanie) oraz bilansowanie obciążeń (koordynacja mocy produkcyjnych urządzeń i pracowników). Rozróżnia się następujące rodzaje planowania produkcji:

¹³⁷ W. Kubiński, *Inżynieria i technologie produkcji*, Kraków, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, 2008, s. 274–280.

¹³⁸ I. Durlik, *Inżynieria Zarządzania: strategia i projektowanie systemów produkcyjnych, cz. I.*, Warszawa, Wydawnictwo Placet, 2007, s. 31–50.

1. Planowanie globalne – ma formę funkcji matematycznej składającej się z zależności między elementami systemu produkcyjnego, a jej rozwiązaniem, które jest optymalne w sensie matematycznym i odpowiada warunkom rzeczywistym.
2. Planowanie hierarchiczne – zależności między elementami systemu produkcyjnego analizowane są w obrębie wyróżnionych poziomów struktury systemu.
3. Planowanie sukcesywne – opiera się na powtarzalnej strukturze procesu planowania niezależnej od warunków.

Proces planowania uzależniony jest od: struktury wyrobów, przebiegu produkcji (forma), liczby zamówień (skala), zapotrzebowania. W etapach planowania produkcji (rys. 27) należy uwzględnić stopień wykorzystania maszyn i urządzeń w celu zapewnienia płynnej pracy, rezerwację miejsca na surowce i wyroby gotowe, ilość osób pracujących, czas niezbędny do wykonania zadań, potrzeby materiałowe.



Rys. 27. Etapy planowania produkcji

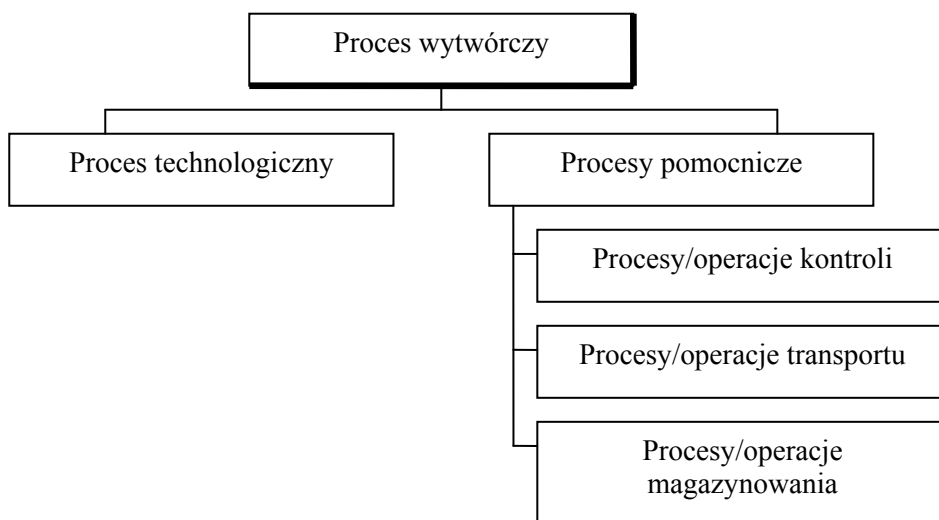
Źródło: opracowanie własne na podstawie W. Kubiński, *Inżynieria i technologie produkcji*, Kraków, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, 2008, s. 274–276.

Przy optymalizacji produkcji konieczne jest uwzględnienie następujących działań:

- projektowania struktury procesu technologicznego,
- planowania produkcji,
- oszacowania parametrów wejścia i wyjścia.¹³⁹

¹³⁹ W. Kubiński, *Inżynieria i technologie produkcji*, Kraków, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, 2008, s. 274–276.

Sfera wytwórcza wymaga optymalnego modelu systemu produkcyjnego, adekwatnego do potrzeb rynku.¹⁴⁰ Wytwarzanie wyrobów musi odbywać się w zaprojektowanym celowo procesie wytwórczym, który nadaje im odpowiednie cechy. Na proces wytwarzania składają się procesy technologiczne oraz procesy pomocnicze i towarzyszące im wewnętrzne procesy. Należy podkreślić, że w skład procesu wytwórczego wchodzi wszystkie działania konieczne do przekształcenia surowców, materiałów i półwyrobów w wyrób o wymaganej jakości. Z tego względu obejmuje on nie tylko te czynności, które prowadzą do wykonania poszczególnych detali, łączenia ich w gotowy wyrób, lecz także głównie takie czynności, jak: techniczne przygotowanie wyrobów, organizacja produkcji, zapewnienie pracy maszyn, urządzeń i oprzyrządowania, zapewnienie transportu, magazynowania. Wyodrębnia się główne elementy składowe procesu wytwórczego rys. 28.



Rys. 28. Schemat procesu wytwórczego

Źródło: opracowanie własne na podstawie W. Kubiński, *Inżynieria i technologie produkcji*, Kraków, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, 2008, s. 249–255.

Wybór technologii produkcji zależy jest od wymagań dotyczących wielkości przepływu strumienia materiałów przez poszczególne komórki produkcyjne w określonym czasie. Na tym etapie należy podjąć decyzję w zakresie wykorzystania zasobów produkcyjnych i materiałowych, które pozwolą na sprecyzowanie

¹⁴⁰ I. Durlik, *Inżynieria Zarządzania: strategia i projektowanie systemów produkcyjnych, cz. I.*, Warszawa, Wydawnictwo Placet, 2007, s. 31–50.

momentu rozpoczęcia i zakończenia procesu.¹⁴¹ Technologia zawiera operacje technologiczne, które należy wykonać, aby otrzymać wyrób finalny. Pojęcie samego procesu technologicznego można opisać jako zbiór czynności związanych bezpośrednio ze zmianą własności fizycznych (kształt, wielkość) oraz chemicznych materiału.¹⁴² Zmiany te mogą być dokonywane poprzez działanie na surowiec odpowiednim narzędziem bądź pod wpływem oddziaływania na właściwości fizyczne lub chemiczne surowców energii w jakiegokolwiek postaci (np. elektryczna, reakcji chemicznych czy biochemicznych).¹⁴³ O. Cizsak proces technologiczny postrzega jako część procesu produkcyjnego tej samej części lub wyrobu, który może być wykonywany według różnych wariantów różniących się między sobą wyposażeniem technologicznym, pracochłonnością, kosztem, kolejnością czynności.¹⁴⁴ Proces technologiczny składa się z kilku, a nawet kilkunastu operacji i procesów podstawowych, które mają wpływ na przetwarzany surowiec. Każdy przebieg można opisać fizycznie i matematycznie. Realizacja procesu technologicznego wymaga odpowiedniego wyposażenia technicznego, specjalistycznej aparatury i właściwych urządzeń. Działanie tych środków technicznych wymaga dopływu energii, wody, sprężonego powietrza itp. Natomiast przeprowadzenie takiego procesu wymaga wiedzy, kontroli i sterowania parametrami. Proces technologiczny można określić jako układ dynamiczny z wchodzącymi strumieniami surowców energii i informacji oraz z wychodzącymi strumieniami produktów i elementów wpływających na środowisko. Ma on przewidywalny wpływ na surowiec, a jego przebieg można opisać fizycznie i matematycznie. Opis matematyczny jest jednolity, tylko parametry występujące w równaniach zależą od tego, gdzie dany proces został zastosowany (rys. 29).

Zjawiska zachodzące w procesie mogą być opisane przez właściwości ekstensywne lub intensywne. Na wielkość ekstensywną składa się wielkość geometryczna lub fizyczna dotycząca całego obszaru o skończonych wymiarach. Do wielkości ekstensywnych zalicza się: objętość, masę, energię cieplną, kinetyczną, pęd, ładunek elektryczny itd. Z kolei za wielkość intensywną uważa się wielkość przypisaną punktowi w przestrzeni. Zalicza się tutaj temperaturę, ciśnienie, potencjał chemiczny, napięcie, gęstość itd. Niektóre wielkości intensywne są ilorazami wielkości ekstensywnych. Zmiany wielkości ekstensywnych są wynikiem zjawisk zachodzących wewnątrz układu i oddziaływań między układem, a otoczeniem. Bilansowanie wielkości ekstensywnej wymaga operowania jej ilością. W inżynierii wprowadzone jest pojęcie strumienia, które określa ilość

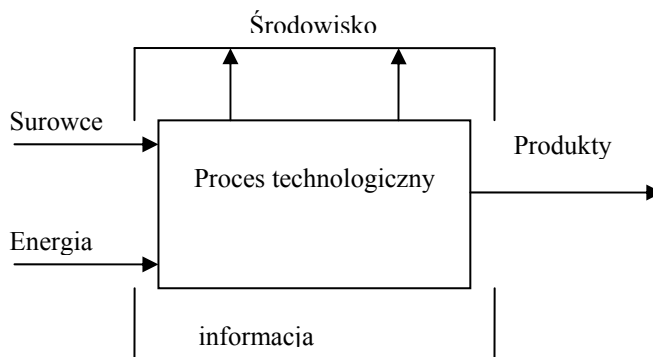
¹⁴¹ P. Lewicki, *Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2005, s. 14–25.

¹⁴² M. Feld, *Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn*, Warszawa, WNT, 2009, s. 17–21.

¹⁴³ W. Kubiński, *Inżynieria i technologie produkcji*, Kraków, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, 2008, s. 249–255.

¹⁴⁴ O. Cizsak, *Komputerowo wspomagane modelowanie i symulacja procesów produkcyjnych*, [W:] Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, nr 6, 2007, s. 39–45.

i gęstość materii, energii, ładunku elektrycznego przenoszona w jednostce czasu. Proces bilansowania wielkości ekstensywnej zależy od przyjętego modelu jej transportu.¹⁴⁵



Rys. 29. Uogólniony proces technologiczny

Źródło: P. Lewicki, tamże..., 2005, s. 14–25.

Wszystkie etapy powinny być uwzględnione przy planowaniu procesu technologicznego, który dostosowywany jest formy organizacji produkcji (związanej ze sposobem przepływu materiałów). Z charakteru przepływu materiałów wynika forma organizacji produkcji. Zasadniczo wyróżnia się dwie podstawowe formy:

- niepotokową, charakteryzującą się nieregularnością, stosowaną najczęściej w gniazdach technologicznych lub przedmiotowych,
- potokową, realizowaną w sposób ciągły bez strat oczekiwania (linie produkcyjne).¹⁴⁶

Projektowanie procesów produkcyjnych ściśle wiąże się z określaniem zasobów systemu produkcyjnego SP, przydzieleniem ich do wykonania operacji procesu technologicznego wraz z rozmieszczeniem zasobów i opracowaniem przepływu materiałów między tymi zasobami. Z reguły wielkość produkcji można podzielić na serie produkcyjne, dla których opracowuje się proces technologiczny. Wielkość tych serii jest czynnikiem, który ma wpływ na opracowanie procesu. Typ organizacji produkcji ma związek ze skalą produkcji (zwaną także programem produkcyjnym).

¹⁴⁵ P. Lewicki, *Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego*, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2005, s. 14–25.

¹⁴⁶ A. Kawecka-Endler, *Organizacja technologicznego przygotowania produkcji-prac rozwojowych*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2004, s. 85–86; F. Dziubiński, Z. Lenik, *Wprowadzenie do techniki*, Lublin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 2007, s. 57.

Z punktu widzenia organizacji procesów można wyróżnić typy produkcji:

- jednostkową,
- masową,
- seryjną, podlegającą podziałowi na: małoseryjną, średnioseryjną, wielkoseryjną.¹⁴⁷

Orientacyjną wielkość różnych rodzajów produkcji podano w tab. 26.

Tab. 26. Wpływ skali produkcji na wybrane czynniki związane z procesem technologicznym

Wielkość charakteryzowana	Rodzaj produkcji		
	jednostkowa	seryjna	masowa
Wielkość produkcji	Mała liczba wykonywanych wyrobów. Brak z góry ustalonej powtarzalności	Średnia liczba wykonywanych wyrobów. Okresowe uruchamianie serii	Duża liczba wykonywanych wyrobów. Ciągła produkcja przez znaczny okres
Rodzaje maszyn i urządzeń	Uniwersalne (ogólnego przeznaczenia)	Produkcyjne, specjalizowane, sterowane numerycznie	Specjalne, linie zespołowe
Opracowanie procesów technologicznych	Technologia bardzo uproszczona	Pełna dokumentacja technologiczna	Bardzo szczegółowe opracowanie procesów technologicznych i systematyczne ich badanie
Koszt przygotowania produkcji	Koszt przygotowania produkcji bardzo niski	Koszt przygotowania produkcji wysoki	Koszt przygotowania produkcji bardzo wysoki
Koszt jednostki produkcji	Koszt jednostki produkcji bardzo wysoki	Koszt jednostki produkcji niski	Koszt jednostki produkcji bardzo niski

Źródło: opracowanie własne na podstawie M. Feld, *Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn*, Warszawa, WNT, 2009, s. 29–31.

Nazwy te jednak, nie precyzują jednoznacznie kryteriów podziału warunków organizowania produkcji. Wielkości wytwarzanych serii nie mogą być podstawą przy ocenie stabilizacji produkcji.¹⁴⁸

Znaczący wpływ na efektywność wykorzystania wyposażenia mają zasady planowania produkcji. Do jednej z tych zasad zalicza się współczynnik detalooperacji k , który w przypadku wytwarzania dyskretnych detali, jest stosunkiem

¹⁴⁷ A. Antczak, P. Antczak, T. Witkowski, *Analiza wpływu typu organizacji produkcji na sumaryczny czas wykonania zadań produkcyjnych*, [W:] *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Automatyka*, nr 151, 2008, s. 81–86.

¹⁴⁸ J. Mazurczak, *Projektowanie struktur systemów produkcyjnych*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2002, s. 21–26.

liczby wszystkich operacji technologicznych (wykonywanych w ciągu miesiąca) do liczby stanowisk roboczych. Określa się do według wzoru:

$$k = \sum_{i=1}^m P_{oi} / L_r = \sum_{i=1}^m P_{oi} F / \sum_{i=1}^m N_i t_i$$

gdzie:

$\sum_{i=1}^m P_{oi}$ – ogólna liczba operacji technologicznych dla wszystkich i -tych wyrobów wykonywana w podsystemie w ciągu jednego miesiąca,

L_r – liczba wykorzystywanych maszyn,

N_i – program miesięczny i -tego wyrobu,

t_i – pracochłonność i -tego wyrobu,

F – miesięczny fundusz pracy maszyn.

Współczynnik k dla SP określa się uwzględniając sumaryczne oddziaływanie detalooperacji wykonywanych w ciągu określonego czasu. Wystąpienie konkretnego zbioru detalooperacji w produkcji seryjnej ma charakter losowy w stosunku do porównywanych okresów t . Zatem współczynnik k jest wielkością losową i rozpatrywany jest w ciągu szeregu okresów jako zmienna (można określić jej średnią wartość k_{SR}). Można to określić na przykładzie obliczenia średniego liniowego odchylenia ρ .

$$\rho = \frac{\sum_{t=1}^T |k_t - k_{SR}|}{T}$$

gdzie:

T – liczba okresów,

V_p – współczynnik wariancji, $V_p = \rho \cdot 100 / k_{SR}$

Zmiana wielkości k w różnych okresach czasu świadczy o jej wrażliwości na zmiany struktury skali produkcji, parametrów wyrobów. Zmiana wielkości partii wyrobów, cyklu powtarzalności wpływa na liczbę operacji technologicznych.¹⁴⁹

¹⁴⁹ A. Antczak, P. Antczak, T. Witkowski, *Analiza wpływu typu organizacji produkcji na sumaryczny czas wykonania zadań produkcyjnych*, [W:] Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Automatyka, nr 151, 2008, s. 81–86.

2.2. Wykorzystanie modelowania do optymalizacji procesu

Optymalizacja produkcji wymaga zastosowania odpowiednich metod planowania, sterowania, harmonogramowania i kontroli, które należy dopasować do cech systemu produkcji i potrzeb rynku.¹⁵⁰ Ma to na celu umożliwić sprawne i efektywne wykonywanie zadań, tok operacji, przepływ surowców i danych, wynikiem czego staje się wyrób gotowy bądź usługa. Produkcja musi łączyć szereg zabiegów poczynając od zaopatrzenia w surowce, wytwarzanie, logistykę aż po efektywność energetyczną. W sferze wytwórczej wiąże się to z wyborem właściwych kluczowych elementów, które zapewnią jej elastyczność, rytmiczność, zrównoważony przepływ materiałów i informacji oraz wykorzystaniu zdolności produkcyjnych. Duża liczba czynników różnie wpływających na proces, powoduje potrzebę modułowej budowy oraz istnienia wewnętrznych sprzężeń modułów procesu.¹⁵¹ Dla urzeczywistnienia produkcji muszą istnieć odpowiednie narzędzia do projektowania elastycznych systemów produkcyjnych (ESP).¹⁵² Procesy realizowane w systemie wytwarzania są projektowane i koordynowane w przestrzeni i w czasie, a więc mają swoją strukturę przestrzenną i czasową.¹⁵³ W tych procesach występuje wiele zagadnień optymalizacyjnych, a do ich rozwiązania stosuje się wiele różnych modeli systemów.¹⁵⁴

Modele będące środkami naukowymi znane są od dawna. Pojęcie modelu nie jest pojęciem jednoznacznym, brak konkretnej definicji i ogólnie przyjętych klasyfikacji. Słowo model pochodzi od łac. *modulus* (sposób, obraz, miara). Istnieje wiele definicji modeli, a niektóre z nich to:

- model jako układ odtwarzający przedmiot badania dostarczający nowej wiedzy o przedmiocie,
- model jako narzędzie opisujące system i jego zachowanie się w różnych warunkach zewnętrznych,
- model jako teoretyczny opis badanego obiektu,¹⁵⁵
- model jako sens stworzonej teoretycznie struktury odzwierciedlającej część badanej rzeczywistości,
- model jako sens opisu nowych zjawisk (mniej zrozumiałych) przy pomocy pojęć już znanych,¹⁵⁶

¹⁵⁰ J.M. Myszewski, *Controllability and operability in manufacturing process*, [W:] Innovative and intelligent manufacturing systems, Poznań, red. M. Fertsch, 2010, p. 45–55.

¹⁵¹ P. Lewicki, *Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego*, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2005, s. 14–25; Z. Biniek, *Elementy teorii systemów modelowania i symulacji*, [W:] Skrypt akademicki wyd. III Internetowe, Szczecin, Wydawnictwo INFOPLAN, 2002, s. 93–157.

¹⁵² R. Zdanowicz, *tamże...*, s. 9–14.

¹⁵³ W. Kubiński, *Inżynieria i technologie produkcji*, Kraków, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, 2008, s. 264–281.

¹⁵⁴ M. Brzeziński, *Organizacja sterowanie produkcją. Projektowanie systemów produkcyjnych i procesów sterowania produkcją*, Warszawa, Wydawnictwo Placet, 2002, s. 214–216.

¹⁵⁵ S. Niziński, *Eksploatacja obiektów technicznych*, Radom, ITE, 2002, s. 277.

- model jako przedstawienie oryginału, ściśle określonego przez cel modelowania,¹⁵⁷
- model jako układ materialny lub abstrakcyjny, który na skutek pewnych pobudzeń zachowuje się podobnie jak modelowany układ (oryginał).¹⁵⁸

Główną cechą modeli jest zdolność do zastępowania badanego obiektu w procesie jego badań. To oznacza, że wiedza uzyskana drogą doświadczalną o modelu może być przeniesiona na rzeczywisty obiekt badań. Gdy rzeczywisty system jest poddawany dekompozycji na części składowe, wówczas modelem jest reprezentacja opisująca ten system na każdym poziomie. A więc model jako abstrakt jest przedstawieniem teorii lub doświadczalnej obserwacji obiektu. Modele mogą być klasyfikowane na różne sposoby:

- fizyczne (materialne) budowane w różnej skali,
- schematyczne jako diagramy, schematy i mapy,
- symboliczne w postaci zapisu matematycznego bądź algorytmicznego.

Modele można sklasyfikować również następująco:

- statyczne czyli takie, które uwzględniają udziału czasu,
- dynamiczne opierające się na upływie czasu.¹⁵⁹

Taka różnorodność stosowanych modeli jest wynikiem rozważanych zagadnień uwzględniających własności strukturalne, funkcjonalne systemów, skalę, specyfikę budowy, przeznaczenie i działanie systemów uwzględniających dynamikę procesów, charakterystyki zmiennych, rodzaj funkcji celu.¹⁶⁰ Każdy model jest budowany dla konkretnych celów i zastosowań. Modele są opracowywane na różnych poziomach szczegółowości. Większa szczegółowość modelu prowadzi do wzrostu trudności procesu modelowania, zwiększenia ilości danych, które należy przetworzyć, co spowalnia eksperyment symulacyjny. Rys. 30 przedstawia systematykę modeli:

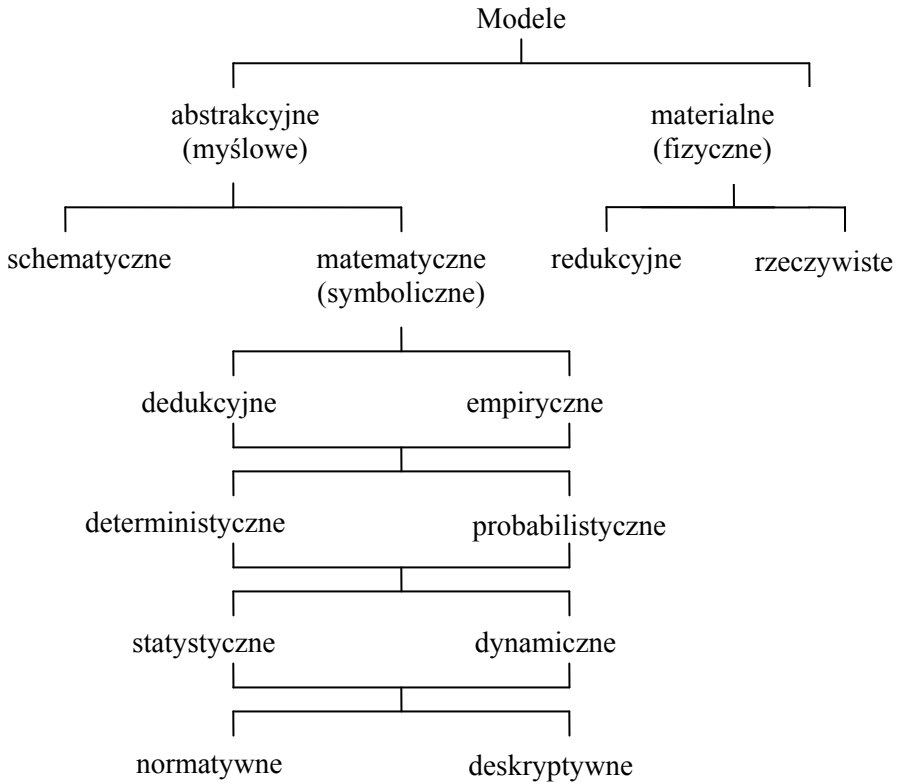
¹⁵⁶ R. Zdanowicz, *Modelowanie i symulacja procesów wytwarzania*, Gliwice, WPS, 2007, s. 29–34.

¹⁵⁷ M. Jaros, S. Pabis, *Inżynieria systemów*, Warszawa, SGGW, 2007, s. 5–16.

¹⁵⁸ W. Tarnowski, *Modelowanie systemów technicznych*. Skrypt do wykładu dla Studium Doktoranckiego, Koszalin, 2003, s. 6.

¹⁵⁹ R. Zdanowicz, tamże..., s. 29–34.

¹⁶⁰ M. Brzeziński, *Organizacja sterowanie produkcją. Projektowanie systemów produkcyjnych i procesów sterowania produkcją*, Warszawa, Wydawnictwo Placet, 2002, s. 214–216.



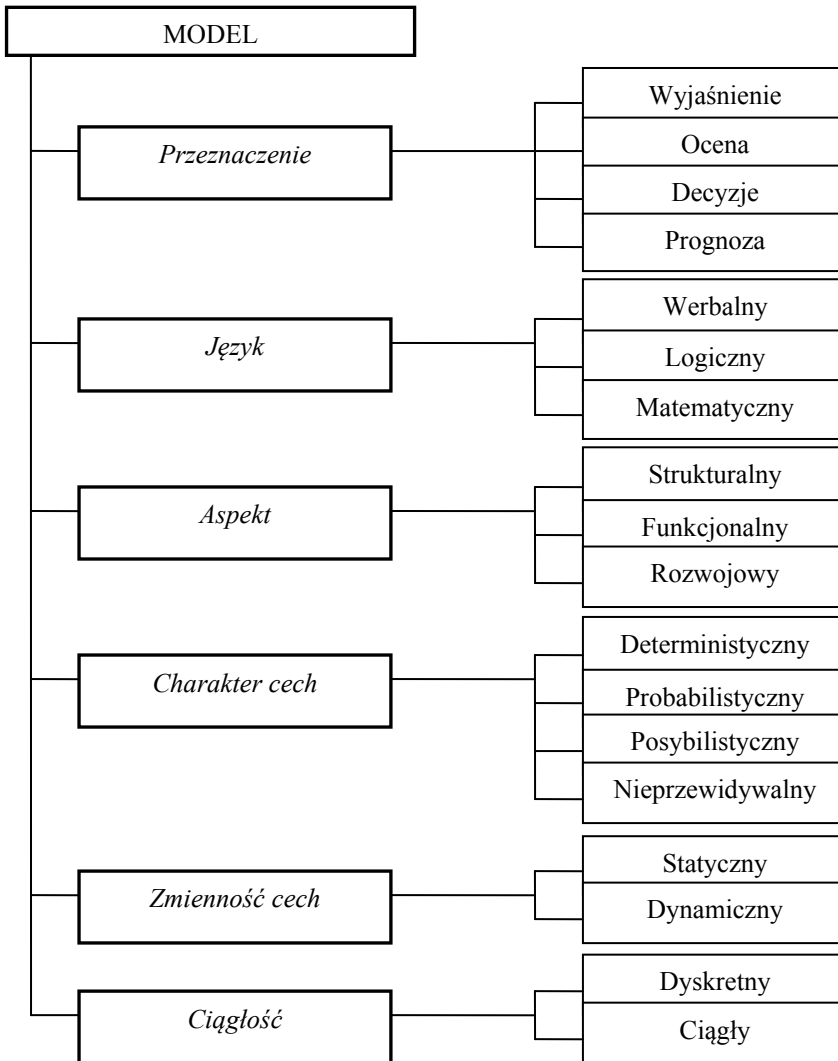
Rys. 30. Systematyka modeli

Źródło: R. Zdanowicz, *Modelowanie i symulacja procesów wytwarzania*, Gliwice, WPS, 2007, s. 29–34.

Różnorodność modeli wynika z różnorodności wielu okoliczności. Dlatego przy ich systematyzacji bierze się pod uwagę różne kryteria. Stąd też innego podziału modeli (rys. 31) można dokonać według: przeznaczenia, aspektu, języka, charakteru cech i ich zmienności w czasie.

Prowadzone na modelach badania dostarczają informacji i umożliwiają szeroką ocenę jakościową oraz ilościową występujących zdarzeń. Szczególną rolę odgrywa modelowanie, czyli tworzenie modeli układów rzeczywistych przy uwzględnieniu potrzebnej dokładności i dopuszczalnych kosztów modelowania.

Przed przystąpieniem do modelowania należy odpowiedzieć na postawione pytania: Co jest celem modelowania (jakie wielkości chcę znaleźć)? Czy celem takiego modelowania jest model dla optymalizacji procesu? Jaki jest zakres badań? Czy będzie to diagnostyka czy sterowanie? Co wiem o procesie (jakimi danymi dysponuję i czego mi brakuje, jak mogę je pozyskać: zmierzyć, dostać...)? Jaką teorią dysponuję?



Rys. 31. Specyfikacja modeli

Źródło: L. Powierża, *Elementy inżynierii systemów*, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1997, s. 93.

Metody stosowane do modelowania *ESP* można podzielić na dwie kategorie: metody analityczne i symulacyjne.

1) Modelowanie analityczne dotyczy opisu obiektu modelowania przy pomocy układu zależności matematycznych. W skład języka opisu analitycznego wchodzi następujące elementy semantyczne: kryterium, niewiadome, dane, operacje, matematyczne, ograniczenia. Cechą charakterystyczną modeli analitycznych jest to, że ich struktura nie jest zgodna ze strukturą obiektu modelowanego. Modele analityczne to modele zbudowane przy pomocy metod programowania matematycznego, analizy regresji i korelacji. Taki model składa się z funkcji celu i układu ograniczeń, które należy spełnić przez wprowadzone zmienne. Funkcja celu opisuje tę charakterystykę systemu, której wartość należy obliczyć lub zoptymalizować np. wydajność systemu, obciążenia maszyn i urządzeń systemu. Zatem proces technologiczny nie ma bezpośredniego odpowiednika w modelu analitycznym.¹⁶¹

Duża liczba możliwych wariantów procesu wymaga opracowania różnych modeli komputerowych i symulacji ich działania, na podstawie czego można wybrać najkorzystniejszy wariant z punktu widzenia przyjętych kryteriów. Wtedy, gdy rozwiązania metodami analitycznymi są skomplikowane lub niemożliwe, a eksperymentowanie jest zbyt pracochłonne lub kosztowne stosuje się metody modelowania i symulacji.¹⁶²

2) Symulacja stanowi narzędzie do optymalizacji procesów produkcyjnych, w których dąży się do uzyskania optymalnych wartości czynników odgrywających ważną rolę w przeprowadzanym procesie.¹⁶³ To metoda analizy istniejącego obiektu: istniejącego materialnie lub w postaci projektu. Jest ona przeprowadzana wtedy, gdy mamy dostateczną informację o obiekcie. Jedną z technik wspomagających sterowanie systemami produkcyjnymi jest symulacja komputerowa umożliwiająca zastosowanie różnych wariantów procesów oraz ich ocenę i wybór najkorzystniejszego z nich.¹⁶⁴

Dzięki niej można ustalać odpowiednie parametry projektowanego systemu. Wiąże się to z tym, że technologia wytwarzania musi rozwiązywać coraz to bardziej złożone problemy w coraz to krótszym czasie. Zatem obiekt modelowania musi być jak najlepiej znany.¹⁶⁵

Modelowanie symulacyjne jest jedną z metod, która ten czas skraca. Należałoby postawić pytanie: Do jakiego celu prowadzi modelowanie i symulacja?

¹⁶¹ R. Zdanowicz, *Modelowanie i symulacja procesów wytwarzania*, Gliwice, WPŚ, 2007, s. 9–34.

¹⁶² O. Ciszak, *Komputerowo wspomagane modelowanie i symulacja procesów produkcyjnych*, [W:] Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, nr 6, 2007, s. 39–45.

¹⁶³ S. Łaba, P. Waćko, *Modelowanie i symulacja procesów produkcyjnych*, [W:] Przemysł Spożywczy, nr 4, tom 63, 2009, s. 6–10.

¹⁶⁴ W. Tarnowski, *Modelowanie systemów technicznych*. Skrypt do wykładu dla Studium Doktoranckiego, Koszalin, 2003, s. 6.

¹⁶⁵ R. Zdanowicz, *tenże...*, s. 25–34.

Pomaga ona zrozumieć kolejność zjawisk czy przewidzieć przebieg procesów, a jest to potrzebne do:

- wyboru optymalnych rozwiązań dla projektowanych procesów,
- sterowania istniejącymi procesami,
- wzbogacania wiedzy dotyczącej zjawisk.¹⁶⁶

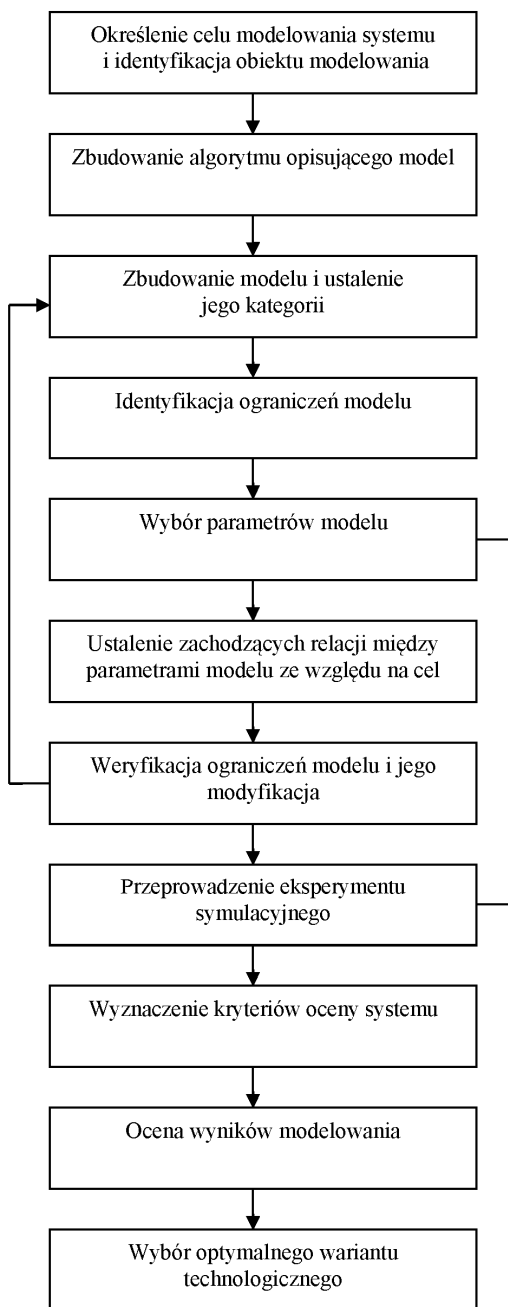
Modelowanie pozwala na optymalizację przepływu zasobów. Jego celem jest nie tylko sformalizowanie opisu problemu, lecz także przedstawienie zagadnienia, które pozwoli uprościć jego rozwiązanie. Zbudowane modele są przydatne na etapie projektowania systemu, jak również przy dokonywaniu wyborów produkcyjnych dotyczących systemu już istniejącego. W przypadku tworzenia systemu modele są potrzebne w rozwiązywaniu zadań projektowania struktury i analizy zachowania systemu produkcyjnego. Natomiast w systemach już istniejących modele pozwalają na określanie wydajności systemu, stopnia wykorzystania urządzeń, przestojów, oceniania opłacalności.¹⁶⁷ Modele symulacyjne mogą być budowane dla procesów ciągłych i dyskretnych. Przeważnie stosowane są w systemach produkcyjnych funkcjonujących w warunkach wielkoseryjnej i masowej ustabilizowanej produkcji, która pozwala na szybkie określenie parametrów systemu produkcyjnego. W produkcji jednostkowej i seryjnej stosuje się tradycyjne metody, nie zawsze efektywne, wymagające często improwizacji. Nieustabilizowanie takiej produkcji powoduje to, że model takiego systemu jest skomplikowany i wymaga ciągłych zmian.¹⁶⁸

Zatem, modelowanie może posłużyć do poznania zachowania technologii wytwarzania, opracowania algorytmów wpływających na poprawę wskaźników jakości procesów wytwarzania oraz przewidywania wpływu zakłóceń na przebieg produkcji. Umożliwia to poznanie danego procesu, poprzez zastąpienie go uproszczonym układem, który odzwierciedla wybrane cechy procesu. Ogólny schemat postępowania przy modelowaniu wygląda następująco:

¹⁶⁶ S. Łaba, P. Waćko, *Modelowanie i symulacja procesów produkcyjnych*, [W:] *Przemysł Spożywczy*, nr 4, tom 63, 2009, s. 6–10.

¹⁶⁷ R. Zdanowicz, *tenże...*, s. 25–34.

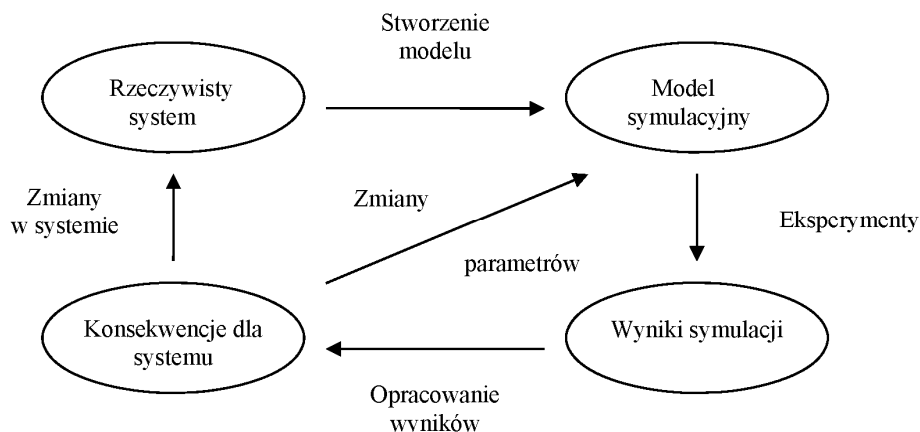
¹⁶⁸ S. Łaba, P. Waćko, *Modelowanie i symulacja procesów produkcyjnych*, [W:] *Przemysł Spożywczy*, nr 4, tom 63, 2009, s. 6–10.



Rys. 32. Etapy modelowania

Źródło: opracowanie własne na podstawie R. Zdanowicz, *Modelowanie i symulacja procesów wytwarzania*, Gliwice, WPS, 2007, s. 25–34.

S. Łaba, P. Waćko proponują realizację modelowania i symulacji w następujący sposób (rys. 33).



Rys. 33. Przebieg modelowania i symulacji

Źródło: S. Łaba, P. Waćko, *Modelowanie i symulacja procesów produkcyjnych*, [W:] *Przemysł Spożywczy*, nr 4, tom 63, 2009, s. 6–10.

Charakterystyczną cechą eksperymentów symulacyjnych jest możliwość nie tylko rozpatrywania konfiguracji działań systemu produkcyjnego (tj. rozpatrywanie przepustowości systemu wytwarzania), lecz wpływu pozostałych zasobów (np. powierzchni magazynów, urządzeń transportowych). Na bazie istniejącego procesu lub na podstawie znajomości charakterystyk strumieni w danym procesie opracowywany jest model. I tak modelowanie wymaga określenia zbioru charakterystyk podsystemów składowych oraz ich wzajemnych relacji. W podsystemie technologicznym można wyróżnić np. wyposażenie technologiczne, podsystem transportu, magazynowania. W skład wyposażenia technologicznego wchodzi maszyny i urządzenia charakteryzujące się określonymi parametrami. Wszystkie elementy i podsystemy można opisać przy pomocy abstrakcyjnych pojęć: wejść, procesów, wyjść.¹⁶⁹ Jeśli istnieją jakiegokolwiek wątpliwości dotyczące przebiegu procesu, należy przeprowadzić modelowanie na niepewnych parametrach. Założenia te mogą obejmować np. wartości parametrów kosztowych czy relacje przedstawione w modelu.¹⁷⁰

¹⁶⁹ R. Zdanowicz, tamże..., s. 9–21; L. Zawadzka, K.E. Oliński, *Computational intelligence methods on production management*, [W:] *Innovative and intelligent manufacturing systems*, Poznań, red. M. Fertsch, 2010, p. 23–42.

¹⁷⁰ UNESCO, *Modelling Methods for Evaluating Alternatives*, [W:] *Water resources systems planning and management*, 2005, p. 59–78.

Modelowanie stosuje się wtedy, gdy inne metody nie zapewniają wymaganego poziomu, że rzeczywisty system wytwórczy będzie zachowywał się zgodnie z odpowiednimi założeniami modelu teoretycznego (wirtualnego).¹⁷¹ Pozwala to na weryfikację założeń jeszcze przed ich zastosowaniem w praktyce, określenie nieprawidłowości jakie mogą wystąpić podczas eksploatacji.¹⁷² Badany model zawsze można udoskonalić dzięki kolejnym symulacjom dla różnych jego wariantów. W analizach można uwzględniać koszty produkcji zgodnie z przyjętymi kryteriami i wybranymi wariantami systemu, co pozwoli na określenie jego efektywności. Przy opracowaniu modelu systemu konieczne jest korzystanie z informacji, danych wejściowych na odpowiednim poziomie jakości, formy czy ilości. Jest to etap wstępny, który umożliwia wyrobienie pewnego poglądu na rozwiązanie problemu.¹⁷³ Ma to na celu zapewnienie wykonywania eksperymentów, śledzenie skutków wprowadzonych zmian, co prowadzi do eliminacji niekorzystnych parametrów mających bezpośredni wpływ na wybór optymalnego wariantu technologii wytwarzania.

Modelowanie i symulacja przeważnie stosowane są w pracach badawczych, jednak coraz częściej wykorzystywane się je w warunkach przemysłowych. W ostatnich latach stały się dostępne różne systemy symulacyjne, od najprostszych (na bazie modeli matematycznych) aż do najbardziej rozbudowanych (ze środowiskiem do tworzenia animacji, grafiki 3D). Tab. 27 przedstawia niektóre programy do modelowania i symulacji procesów.

Przy posługiwaniu się metodą modelowania i symulacji należy brać pod uwagę, aby korzyści z zastosowania tych metod były większe niż nakłady poniesione na ich realizację. Z zastosowania tej metody wynika szereg korzyści:

- nieduży koszt i czas przygotowania symulacji,
- sprawdzanie działania systemu produkcyjnego,
- „elastyczność” modelu i łatwość uzupełniania modelu o nowe zjawiska,
- możliwość wprowadzania wymuszeń i zakłóceń losowych lub ekstremalnych w badanym modelu,
- przewidywanie przyszłych zagrożeń,
- określenie parametrów wpływających na optymalizację procesu,
- wiarygodność wyników symulacyjnych,
- analiza wyników wybranego rozwiązania,
- kontrola czasu realizacji.¹⁷⁴

¹⁷¹ O. Ciszak, *Komputerowo wspomagane modelowanie i symulacja procesów produkcyjnych*, [W:] Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, nr 6, 2007, s. 39–45.

¹⁷² G. Ćwikła, G. Gołda, *Modelowanie i symulacja jako narzędzie poprawy wydajności produkcji wyrobów wielkogabarytowych*, [W:] *Komputerowo zintegrowane wytwarzanie*, Warszawa, red. R. Knosala, WNT, 2005, s. 235–245.

¹⁷³ O. Ciszak, *Modelling and Simulation of the final assembly using the Flexsim software*, in: *3rd International VIDA Conference*, Poznań, 28–29.06.2007, s. 25.

¹⁷⁴ S. Łaba, P. Waćko, tamże..., s. 6–10; W. Tarnowski, *Modelowanie systemów technicznych*. Skrypt do wykładu dla Studium Doktoranckiego, Koszalin, 2003, s. 6–40.

Tab. 27. Niektóre programy do modelowania i symulacji procesów

Nazwa programu	Producent programu	Główne przeznaczenie
Enterprise Dynamics Simulation Software	Production Modeling Corporation	Procesy produkcyjne – weryfikacja, analiza i optymalizacja
Lean Mast	CMS Research Inc	Analiza przepływu materiałów w procesie produkcyjnym
Plant Simulation	UGS	Obiektowo zorientowany program do symulacji, wizualizacji i optymalizacji dyskretnych procesów produkcyjnych
ShowFlow 2	Incontrol Enterprise Dynamic GmbH	Optymalizacja procesów produkcyjnych
Simul 8 Professional	Simul 8 Corporation	Zarządzanie przepływem materiałów w procesach wytwórczych i jego analiza
Arena	EFIX	Procesy dyskretne w złożonych systemach
Delmia	Dassault Systemes	Projektowanie i optymalizacja procesów wytwarzania
Fitness Optimizer	Lanner	Optymalizacja środowiska produkcji
Enterprise Dynamics Studio	Incontrol Enterprise Dynamics	Analiza procesów produkcyjnych i biznesowych
Flexsim	Flexsim Software Products, Inc.	Procesy produkcyjne, logistyka, magazynowanie
Taylor II	F&H Simulations, Enterprise Dynamics	Wspomaganie etapów modelowania, w tym budowy modelu, eksperymentów, analiza wyników
Visual SimNet		ECC International Crop

Źródło: opracowanie własne na podstawie O. Ciszak, *Komputerowo wspomagane modelowanie i symulacja procesów produkcyjnych*, [W:] Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, nr 6, 2007, s. 39–45; S. Łaba, P. Waćko, *Modelowanie i symulacja procesów produkcyjnych*, [W:] Przemysł Spożywczy, nr 4, tom 63, 2009, s. 6–10.

Struktura technologii wytwarzania powinna charakteryzować się możliwością dopasowywania się aktualnych i przewidywanych zmian w otoczeniu. Jest to możliwe dzięki sterowaniu procesami technologicznymi. Istnieje możliwość zastosowania następujących metod:

1. Sterowanie terminem zamówień – można je zastosować, gdyż znamy skalę produkcji i czas jej realizacji.
2. Sterowanie poziomem zapasów – można je wykorzystać po przeanalizowaniu stanu aktualnych zapasów, a przekroczenie pewnego ich limitu daje możliwość uruchomienia produkcji.

2.3. Charakterystyka wybranych modeli

Świadome wpływanie na przebieg procesów technologicznych wymaga nie tylko wiedzy technologicznej, ale i inżynierskiej. Inżynieria systemów opiera się na znajomości praw rządzących tymi procesami, a zachodzące związki tworzące struktury systemów wyrażane są przy pomocy odpowiednich modeli, które można zbudować poprzez wygenerowanie elementów z istniejących fragmentów rzeczywistości. Poznanie procesów wiąże się z budową modelu opisującego system i jego działanie. Różnorodność systemów i procesów daje możliwość tworzenia różnego typu modeli, a których wyróżnia się zbiór elementów, zmienne opisujących system oraz relacje wiążące te elementy. Przy budowie modelu ważnym momentem jest badanie adekwatności tego modelu i jego weryfikacja.

Oryginał istnieje wcześniej niż jego model i podczas modelowania jest wzorcem dla tworzonego modelu. Zatem podobieństwo i zastępowalność modeli do ich oryginałów może dotyczyć struktur, struktur i działania lub samego działania.¹⁷⁵

W dalszej części pracy zostaną omówione niektóre modele, a wśród nich: modele matematyczne, modele empiryczne.

Omawiając rodzaje modeli można posługiwać się pojęciem podobieństwa traktując je jako synonim możliwości zastępowania ze względu na określony cel modelowania.

2.3.1. Modele matematyczne

Badanie procesów na skalę przemysłową odbywa się przy użyciu modeli fizycznych i symulacji matematycznej imitującej przebieg procesów w rzeczywistości. Złożoność procesów powoduje, że badania modelowe są wyidealizowane i odwzorowują tylko najważniejsze zjawiska w procesie. Zbiór informacji pozyskanych z badania modelu fizycznego służy do budowy modelu matematycznego przedstawiającego proces. Sformułowanie modelu wynika z dostępności i dokładności informacji oraz z możliwości i czasu trwania obliczeń. Ze względu na uproszczenia, model matematyczny jedynie przybliża proces rzeczywisty.¹⁷⁶ Im bardziej model matematyczny ma reprezentować rzeczywistość, tym trudniej do zbudować. Stopień zgodności takiego modelu z opisem obiektu przeważnie mierzony jest błędami modelu w stosunku do opisu i podlega wyborowi. Można go tworzyć przez odpowiedni dobór wielkości wejściowych i wyjściowych oraz przy pomocy odpowiedniego wyboru rodzaju i stopnia dokładności relacji zachodzących w tym modelu. Rodzaj relacji wybiera się taki, który odzwierciedla wybrane metody i algorytmy sterowania system produkcyjnym. I tak, zbudowanie modelu matematycznego służącego do rozwiązywania problemów sterowania

¹⁷⁵ M. Jaros, S. Pabis, *Inżynieria systemów*, warszawa, SGGW, 2007, s. 17–19.

¹⁷⁶ P. Lewicki, *Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego*, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, 2005, s. 14–25.

działalnością systemów produkcyjnych wymaga ujęcia zarówno decyzji dotyczących kierowania w poszczególnych procesach technologicznych oraz decyzji z zakresu problematyki zarządzania, jak też ujęcia w modelu chwil czasowych.¹⁷⁷

Modeli matematycznych może być wiele, pojawia się tylko problem wyboru, właściwie opisującego procesy. Za podstawę klasyfikacji można przyjąć m.in. czas, prawdopodobieństwo (udział zjawisk losowych), liczbę wielkości. W ten sposób otrzymywane są modele deterministyczne, losowe, dynamiczne, statyczne, nieliniowe, liniowe.¹⁷⁸

Trzeba sobie uświadomić, że model matematyczny jest zbiorem reguł i zależności, dzięki którym można przewidzieć przy pomocy obliczeń przebieg modelowanego procesu. Taki model jest układem równań, którego rozwiązania są podobne do przebiegów wielkości modelowanej. Służy on do analizy różnych obiektów naturalnych i sztucznych np. technicznych, ekonomicznych, biologicznych, w których zachodzą różne procesy. Te procesy poddawane są modelowaniu.

Celem modelowania matematycznego jest utworzenie formalnego opisu zjawiska w układzie, na który mają wpływ sygnały zewnętrzne $u(t)$, gdzie obserwuje się lub przewiduje przebiegi sygnałów $y(t)$. Sygnały zewnętrzne to tzw. *pobudzenia*, a przebiegi sygnałów to *wyjścia*.

Zmienne

Podział zmiennych używanych do określenia modelu matematycznego jest następujący:

- parametry p – wielkości, które nie są funkcjami zmiennych niezależnych, zatem są stałe w czasie jak i przestrzeni np. stałe materiałowe, wymiary i współczynniki w równaniach modelu; czasem istnieje konieczność uzależnienia ich od zmiennych niezależnych tj. od czasu lub miejsca,
- pobudzenia u – na obiekt wpływ mają sygnały wejściowe lub wymuszenia; jeżeli wszystkie pobudzenia są zerowe to układ jest autonomiczny; zakłócenia to pobudzenia niekontrolowane losowe,
- zmienne wyjściowe y – przedmiotem badań są wartości lub przebiegi, które w układzie rzeczywistym mogą być mierzone,
- zmienne stanu x – stan procesu może być opisany wartościami zmiennych stanu np. $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$
- zmienne niezależne v – współrzędne przestrzeni np. czas, w której zachodzi modelowany proces; jeżeli czas jest zmienną niezależną jest to system dynamiczny, natomiast jeśli żadna ze zmiennych nie jest czasem jest to postać statyczna.

¹⁷⁷ F. Milkiewicz, *Sterowanie systemami produkcyjnymi*, Gdańsk, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2004, s. 70–81.

¹⁷⁸ S. Niziński, *Eksploatacja obiektów technicznych*, Radom, ITE, 2002, s. 280–283.

Inny podział może obejmować:

- zmienne intensywne i ekstensywne,
- zmienne dyskretne i ciągłe,
- zmienne rozmyte i ostre,
- zmienne losowe i deterministyczne.

Model matematyczny systemu

Pod pojęciem modelu matematycznego systemu rozumie się zbiór związków matematycznych tj. równań algebraicznych, różniczkowych, nierówności, funkcji warunkowych koniecznych przy wyznaczaniu zależności:

$$y(v) = f(u, p, v),$$

gdzie:

y – wektor zmiennych wyjściowych,

u – wektor pobudzeń,

p – wektor parametrów,

v – zbiór zmiennych niezależnych.

Przeważnie $y(v)$ występują w postaci pochodnych, często dotyczy to również sygnałów pobudzeń $u(v)$.

Model matematyczny procesu

Natomiast, gdy ze zbioru pobudzeń u wydziela się zakłócenia z , to powyższe równanie można zapisać w następującej postaci:

$$y(v) = f(u(v), z(v), p, v),$$

przy czym:

y – wyjścia,

u – wymuszenia,

z – zakłócenia,

p – parametry stałe,

v – zmienne niezależne np. czas,

f – zależności np. algebraiczne, logiczne, całkowe, różniczkowe.

Gdy w zbiorze zmiennych y można doszukać się takiego podzbioru $x \subset y$, że wszystkie równania różniczkowe da się zapisać jako równania (1-go rzędu), od czasu t w postaci:

$$\frac{dx}{dt} = \varphi_1(x(t), u(t), z(t), p, t),$$

wówczas takie zmienne x określa się mianem zmiennych stanu.

Model matematyczny $y(v) = f(u(v), z(v), p, v)$ można przedstawić jako dwa równania macierzowe:

- a) różniczkowe równanie stanu: $\frac{dx}{dt} = \varphi_1(x(t), u(t), z(t), p, t)$,
 b) algebraiczne równanie wyjściowe: $y = \varphi_2(x(t), u(t), z(t), p, t)$.¹⁷⁹

Tworzenie modelu matematycznego procesu

Tworzenie modelu matematycznego i jego weryfikacja są podstawą każdego procesu.¹⁸⁰ Taki model zawiera zmienne znane i te, które zostaną określone. Dane o procesie uzyskuje się w wyniku analiz, obserwacji między zmiennymi na wejściu i wyjściu z układu.¹⁸¹ Budowa modelu matematycznego opiera się na:

- paradygmatach,
- równaniach definicyjnych,
- szczegółowych modelach zjawisk, np. prawo Hooker'a, Ohma,
- opisach więzów kinematycznych i dynamicznych.

Z technicznego punktu widzenia mogą to być ujęcia wychodzące z paradygmatu zasady zachowania energii tj.:

- równania bilansowe,
- równanie Lagrange'a.

Na takich technikach opierają równania różniczkowe. Gdy równania są zwyczajne, to ich postać można zapisać jako równanie stanu. Natomiast jeśli są liniowe, wówczas mają postać sumy. Postać transmitancji (funkcji przejścia jako stosunku sygnału wyjściowego do sygnału wejściowego) przyjmują jeżeli warunki początkowe były zerowe. Wtedy, gdy równania różniczkowe mogą mieć rozwiązania analityczne, model matematyczny można zapisać jako równania algebraiczne. Jeżeli wielkość wyjściowa jest funkcjonalem, to w modelu matematycznym występuje równanie całkowe. Równania modelu matematycznego można sklasyfikować następująco:

- równania dynamiki,
- równania więzów,
- równania definicyjne.¹⁸²

¹⁷⁹ W. Tarnowski, *Modelowanie systemów technicznych*. Skrypt do wykładu dla Studium Doktorckiego, Koszalin, 2003, s. 6–40.

¹⁸⁰ P. Lewicki, *Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego*, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2005, s. 14–25.

¹⁸¹ UNESCO, *Modelling Methods for Evaluating Alternatives*, [W:] Water resources systems planning and management, 2005, p. 59–78.

¹⁸² W. Tarnowski, *Modelowanie systemów technicznych*. Skrypt do wykładu dla Studium Doktorckiego, Koszalin, 2003, s. 35–40.

Istnieją dwa sposoby budowy modeli matematycznych:

1. Metoda eksperymentalna bazująca na badaniach doświadczanych (jeśli są nieznanne podstawy teoretyczne lub zjawiska szczególnie złożone);
2. Metoda teoretyczna posługująca się analizą teoretyczną zjawisk związanych z obiektem.¹⁸³

2.3.2. Modele empiryczne

Systemy empiryczne (spotykane często np. w rolnictwie) zbudowane są z dużej ilości obiektów tworzących struktury złożone. Ponadto na systemy te wywierają wpływ losowe oddziaływania otoczenia i zakłócenia wewnętrzne. Służą one do szybkiego i taniego projektowania nowych systemów spełniających wymagania optymalizacyjne jako modele wiedzy praktycznej.¹⁸⁴ Każde przedsięwzięcie empiryczne należy rozważać jako doświadczenie losowe. Za doświadczenie losowe można uznać proces produkcyjny, w którym nie ma pewności co do końcowego rezultatu, mimo sprecyzowanych warunków, determinujących jego przebieg. Rola takich czynników losowych w procesie jest ograniczona do niezbędnego minimum (jest to jeden z celów decydujących o wiarygodności badań).¹⁸⁵

Współczesne systemy eksploatacji opierają się na modelach matematycznych procesów zachodzących w maszynach i urządzeniach energetycznych. Często procesy te są tak złożone, że budowa modeli analitycznych jest trudna i czasochłonna. Wtedy stosuje się modele empiryczne dla wielkości, które są wynikiem przebiegu procesów przepływowych, spalania, wymiany ciepła i substancji.¹⁸⁶ Możliwość tańszych badań, jako źródła informacji, szybko rośnie wraz z rozwojem techniki komputerowej. Naturalne eksperymenty często zastępowane są dużo tańszymi i szybszymi badaniami teoretyczno-numerycznymi. A więc punkt ciężkości procesu badawczego przesuwają się z doświadczeń na symulacje komputerowe.¹⁸⁷ Szybki postęp technologii komputerowej wpływa na coraz szersze stosowanie modelowania matematycznego procesów opartego na analizie zebranych danych (zwanych modelami empirycznymi) bez stosowania podejścia fizyko-chemicznego (wykorzystania praw zachowania, odpowiednich zestawów

¹⁸³ S. Niziński, *Eksploatacja obiektów technicznych*, Radom, ITE, 2002, s. 280–283.

¹⁸⁴ M. Jaros, S. Pabis, *Inżynieria systemów*, Warszawa, SGGW, 2007, s. 17–35.

¹⁸⁵ A. Lis, M. Lis, *Rachunek prawdopodobieństwa w inżynierii jakości*, [W:] Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Górnictwo, z. 255, 2002, s. 333–338.

¹⁸⁶ H. Rusinowski, M. Szęga, W. Stanek, *Ocena energetyczna eksploatacji bloku energetycznego z wykorzystaniem modelowania empirycznego*, [W:] Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Konferencje, tom 2, z. 25, 2007, s. 469–480.

¹⁸⁷ Z. Kośmicki, W. Kęska, S. Feder, *Relacja: badania empiryczne-symulacyjne w procesie przygotowania produkcji maszyn*, [W:] Journal of research and applications in agricultural engineering, vol. 48 (4), 2003, s. 5–9.

równań matematycznych opisujących badany obiekt).¹⁸⁸ Podstawowym zadaniem badań naukowych jest dostarczenie praktyce inżynierskiej efektywnych modeli matematycznych i danych empirycznych, zapewniających możliwość wykorzystania tych modeli.¹⁸⁹ Dane empiryczne pozyskiwane są na dwa sposoby: z przeprowadzonych badań naukowych drogą pomiaru, pozyskane ze statystyk GUS-u.¹⁹⁰

Przy projektowaniu metody badawczej i toku badań empirycznych zakłada się charakter wyników, zakres zmienności ich wartości, wartości graniczne i prawdopodobieństwa ich wystąpienia, a także prawdopodobieństwo przekroczenia wartości kryterialnych. Wyniki badań empirycznych wyrażane są liczbą rezultatu procesu badawczego, która to może obrazować ilość jednostek pomiarowych danej wielkości fizycznej. Na wyniki badań wpływ mają następujące czynniki:

- właściwości doświadczalnego obiektu,
- struktura i właściwości eksperymentalnego modelu,
- struktura i właściwości systemu pomiarowego.

Postępowanie empiryczne dostarcza danych do budowy i weryfikacji modeli. Takie założenia mają wpływ na wybór modelu badawczego (eksperymentu) i jego technicznych parametrów.¹⁹¹

Zasadą modelowania empirycznego jest odrzucenie możliwości wykorzystania modelu fizycznego i równań zachowania, a oparcie się jedynie na analizie zbioru danych doświadczalnych z doborem skorelowanych wejść procesowych. Taka analiza statystyczna ma na celu znalezienie zależności między parametrami wejściowymi i wyjściowymi oraz zbudowanie modelu matematycznego poprzez dobór współczynników modelu. Wyraźną różnicą pomiędzy modelami empirycznymi, a fizycznymi modelami matematycznymi jest brak zależności przyczynowo-skutkowej w modelach empirycznych. W takim przypadku modele empiryczne można skonstruować wtedy, gdy modelowanie fizyczne zawodzi pod warunkiem, że istnieją dane przebiegu procesu. Nawet jeśli model fizyczny istnieje i dobrze opisuje proces, to i tak korzystne jest zastosowanie modeli empirycznych z tego względu na szybszy czas uzyskania wyników czy możliwość automatycznej adaptacji do zmieniających się charakterystyk procesów. Chociaż modele empiryczne nie są rozwiązaniem uniwersalnym, to ich zastosowanie roz-

¹⁸⁸ K. Świrski, P. Domański, J. Lewandowski, *Modele empiryczne w zastosowaniach instalacji energetycznych*, [W:] Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Konferencje, tom 4, z.22, 2002, s. 1229–1238.

¹⁸⁹ Z. Kośmicki, W. Kęska, S. Feder, *Relacja: badania empiryczne-symulacyjne w procesie przygotowania produkcji maszyn*, [W:] Journal of research and applications in agricultural engineering, vol. 48 (4), 2003, s. 5–9.

¹⁹⁰ A. Mreła, *Jakość danych empirycznych w badaniach naukowych*, [W:] Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 51, 2004, s. 87–89.

¹⁹¹ W. Leszek, *Przewidywanie wyników badań empirycznych*, [W:] Problemy eksploatacji, nr 4(47), 2002, s. 79–86.

patruje się wyłącznie pod kątem łatwości wdrożeń i szybkości rezultatów. Będą one przeważały w takich przypadkach, gdy:

- istnieją potrzeby optymalizacji procesu w czasie rzeczywistym (optymalizacja dynamiczna),
- zastosowanie modeli fizycznych jest niemożliwe lub trudne do stworzenia.¹⁹²

2.3.3. Modele fizyczne

Modele materialne odwzorowują systemy, a w nich zachodzące procesy za pomocą podobieństwa geometrycznego (np. prototypów, przekrojów, makiet) oraz fizycznego (np. dynamicznego, termodynamicznego, kinematycznego). Z reguły rozpatrywania dotyczące podobieństwa fizycznego są prowadzone przy założeniu podobieństwa geometrycznego. W modelach fizycznych odbywa się taki sam proces fizyczny jak i w rzeczywistym obiekcie. Każdy model fizyczny ma wiele modeli matematycznych.¹⁹³ Istotą modelowania fizycznego jest spełnienie wymogów fizycznych praw (np. prawa zachowania energii) w miejscu połączenia elementów modelu. W pewnym stopniu jest to analogia do grafu wiązań, a znacząca różnica w porównaniu do schematów blokowych.

Celem budowanych modeli jest lepsze zrozumienie struktury i działania rzeczywistego lub projektowanego systemu. Ich potrzeba uwarunkowana jest tym, że urządzenia przemysłowe, a nawet wyroby powszechnego użytku, są coraz bardziej złożone. Na ogół buduje się wiele modeli, które ujmują w różny sposób te same lub różne elementy systemu. Nie potrzebna jest nadmierna szczegółowość modelu, jak i też nadmierne jego uproszczenie. W czasie projektowania należy budować modele wszystkich elementów systemu niezależnie od ich natury fizycznej.

Efektywne metody analityczne projektowania złożonych systemów, utworzonych z elementów o różnej naturze, nie istnieją lub nie są znane. W takich przypadkach zbudowanie przybliżonego modelu oraz symulacja są niezbędnymi elementami projektowania. Dostępne narzędzia do modelowania i symulacji przeważnie nie są dostosowane do potrzeb projektowania systemów interdyscyplinarnych. Jeśli model fizyczny odwzorowuje strukturę rzeczywistego systemu, to jest łatwiejszy w przygotowaniu, a ewentualne błędy mogą być skutecznie wyeliminowane (do modelowania używa się języka Modelika i pakietu symulacyjnego Dymola).¹⁹⁴

¹⁹² K. Świrski, P. Domański, J. Lewandowski, *Modele empiryczne w zastosowaniach instalacji energetycznych*, [W:] *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Konferencje*, tom 4, z.22, 2002, s. 1229–1238.

¹⁹³ S. Niziński, *Eksplotacja obiektów technicznych*, Radom, ITE, 2002, s. 278–288.

¹⁹⁴ Z. Mrozek, *Modelowanie fizyczne*, [W:] *Pomiary Automatyka Robotyka*, nr 4, 2003, s. 18–23; H. Elmqvist, S.E. Mattsson, H. Olsson, *New Methods for Hardware-in-the-Loop Simulation of Stiff Models*, 2nd *International Modelica Conference*, 2002, p. 59–64.

2.3.4. Modele probabilistyczne

Model nazywany jest probabilistycznym, jeżeli znajomość jego zmiennych w danej chwili pozwala jedynie określić prawdopodobieństwo rozkładu zmiennych w pewnej późniejszej chwili lub pewnej wcześniejszej chwili. Zawiera on co najmniej jedną zmienną losową. Proces stochastyczny postrzegany jest jako abstrakcja matematyczna pewnych empirycznych układów, zmieniających się losowo w czasie.¹⁹⁵ Modele stochastyczne opisują procesy stochastyczne (losowe) inaczej funkcje losowe. Funkcją losową $X(t)$ jest taka funkcja argumentu t , której wartość przy dowolnej wartości t jest zmienną losową, przy czym argumentem funkcji jest czas, ale może być również inna wielkość fizyczna (np. liczba cykli obciążenia maszyny). Centralnym zagadnieniem procesu stochastycznego jest (funkcji losowej) jest zależność lub niezależność jego właściwości od początku przedziału czasowego. Wyróżnia się dwie podstawowe klasy procesów stochastycznych:

- stacjonarne,
- niestacjonarne (procesy A. Markowa).

W stacjonarnych procesach losowych wszystkie wielowymiarowe rozkłady prawdopodobieństwa zależą wyłącznie od wzajemnej odległości chwil $t_1, t_2, \dots, t_n$, nie zależą natomiast od nich samych (jeżeli właściwości statystyczne nie zmieniają się przy translacji osi czasu). Przeważnie właściwości stacjonarnego procesu losowego opisuje się metodą uśrednienia w czasie jednej realizacji funkcji losowej, wziętej ze zbioru relacji. W związku z tym można prawidłowo wyznaczyć charakterystyki stacjonarnego procesu losowego, na podstawie tylko jednej realizacji, co nabiera szczególnego znaczenia w badaniach eksperymentalnych.

W procesach A. Markowa probabilistyczne właściwości procesu stochastycznego w dowolnej chwili t_n są całkowicie określone przez wartości funkcji w chwili t_{n-1} i nie zależą od poprzedzających tę chwilę. Stosowanie tych procesów pozwala na określenie prawdopodobieństwa znajdowania się systemu w ustalonej chwili czasu w dowolnym z analizowanych stanów. Polega to na opisanu stochastycznego procesu odpowiednim układem równań różniczkowych, których rozwiązanie pozwala określić rozkład prawdopodobieństwa przebywania w poszczególnych stanach procesu oraz prawdopodobieństwo zmian stanu.¹⁹⁶

2.3.5. Modele deterministyczne

Modele optymalizacyjne w większości są to modele deterministyczne do podejmowania decyzji strategicznych oraz taktycznych.

¹⁹⁵ W. Oniszczyk, *Metody modelowania*, Białystok, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, s. 8.

¹⁹⁶ S. Niziński, *Eksploracja obiektów technicznych*, Radom, ITE, 2002, s. 277–282; R. Zdanowicz, *Modelowanie i symulacja procesów wytwarzania*, Gliwice, WPS, 2007, s. 35–43; B.P. Zeigler, *Teoria modelowania i symulacji*, Warszawa, PWN, 1984, s. 46–48; T. Nowakowski, *Niezawodność systemów logistycznych*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011, s. 148–151.

D. Morrison wśród modeli matematycznych wyróżnia modele deterministyczne lub deterministyczne z prostymi wielkościami losowymi (np. błędami pomiarów). Jeżeli model został zbudowany na podstawie rozważań teoretycznych lub występujące w nim współczynniki (przy zmiennych niezależnych) zostały wyznaczone na podstawie wcześniej posiadanych danych (nie z eksperymentu), które zostaną użyte do weryfikacji poprawności modelu, to taki model nazywamy deterministycznym. Model deterministyczny z prostymi wielkościami losowymi występuje wtedy, gdy współczynniki w modelu zostały wyznaczone częściowo na podstawie teoretycznych rozważań i częściowo na podstawie danych eksperymentalnych użytych następnie również do weryfikacji poprawności modelu.¹⁹⁷

Według S. Nizińskiego model zaliczany jest do deterministycznego, gdy znajomość wartości odpowiednich zmiennych w danej chwili pozwala określić ich wartości w chwili późniejszej, a także w pewnej chwili wcześniejszej. Modele deterministyczne do podejmowania decyzji strategicznych oraz taktycznych to w większości modele optymalizacyjne.¹⁹⁸ Tymczasem M. Ostwald model określa deterministycznym, gdy wszystkie zmienne są zdeterminowane (tzn. znane, stałe, założone), a każdej możliwej decyzji odpowiada tylko jedna wartość funkcji celu. W opisie modelu zmienne losowe nie występują i ewolucja układu z góry jest przesądzona i uzależniona jest od zmiennych początkowych czy ich wartości poprzednich.¹⁹⁹ Zmienne posiadają w każdym momencie wartość określoną (zdeterminowaną), gdyż albo są one dane lub są wynikami obliczeń otrzymanymi dla tych danych. Wyniki otrzymywane są w sposób powtarzalny i są jednoznaczne. Zatem matematyczny model deterministyczny przy powtarzalności obliczeń dla tych samych danych, daje dokładnie takie same wyniki.²⁰⁰

2.3.6. Modele masowej obsługi

W dobie rozwoju cyfrowej symulacji zdarzeń dyskretnych widać, że wiele systemów ma cechy systemów obsługi masowej. Metody obsługi masowej stosuje się przy wstępnej, jakościowej ocenie charakterystycznych parametrów systemu w stanie ustalonym, na etapie projektowania i planowania systemów produkcyjnych. Znajdują one zastosowanie do szybkiego otrzymywania ilościowych ocen różnych decyzji i parametrów.²⁰¹

Teoria masowej obsługi nazywana również teorią kolejek zajmuje się budową modeli matematycznych, które wykorzystywane są w dowolnych systemach

¹⁹⁷ D.F. Morrison, *Wielowymiarowa analiza statystyczna*, Warszawa, PWN, 1990, s. 16.; A. Kornacki, M. Wesołowska-Janczarek, *O weryfikowaniu poprawności matematycznych modeli procesów w oparciu o dane empiryczne*, [W:] *Problemy inżynierii rolniczej*, r. 16, 3/2008, s. 5–18.

¹⁹⁸ S. Niziński, *tamże...*, s. 278–282.

¹⁹⁹ M. Ostwald, *Podstawy optymalizacji konstrukcji*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, s. 99; J. Bai, *Determining the number of factors in approximate factor models*, [W:] *Econometrica*, vol. 70, no. 1, p. 191–21.

²⁰⁰ Z. Rudnicki, *Zmienne losowe i wprowadzenie do modelowania probabilistycznego*, s. 13.

²⁰¹ R. Zdanowicz, *tenże...*, s.43–44.

działania zwanych systemami masowej obsługi. Racjonalne funkcjonowanie takiego systemu można opisać za pomocą wzoru:

$$Z = D - C \rightarrow Z_{\max},$$

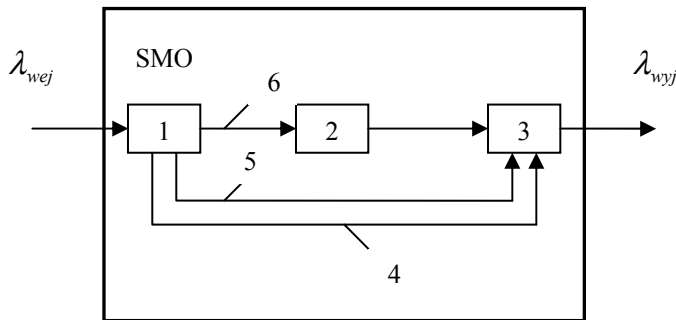
gdzie:

Z – zyski systemu,

D – dochód systemu,

C – koszty funkcjonowania systemu.

Działanie może dotyczyć maksymalizacji dochodu ($D \rightarrow D_{\max}$) przy ustalonych kosztach ($C = \text{const}$) lub minimalizacji kosztów ($C \rightarrow C_{\min}$) przy ustalonym dochodzie systemu ($D = \text{const}$). Rys. 34 przedstawia schemat systemu masowej obsługi.



1 – objekty zgłoszenia, 2 – kolejka obiektów, 3 – stanowiska obsługi, 4 – przemieszczenia obiektów w systemie bez oczekiwania, 5 – bezwzględny priorytet obsługi tj. oznacza przerwanie aktualnie wykonywanej obsługi i wprowadzenie na jego miejsce obiektu z priorytetem, 6 – przemieszczenia obiektu w systemie z oczekiwaniem, λ_{wej} – strumień wejściowy zgłoszeń, λ_{wyj} – strumień wyjściowy obsługiwanych obiektów.

Rys. 34. Schemat systemu masowej obsługi (SMO)

Źródło: S. Niziński, tamże..., s. 305–306.

Model matematyczny funkcjonowania SMO opiera się na teorii procesów stochastycznych, w którym występują zmienne losowe, czyli:

τ_1 – czas upływający między wejściem do systemu dwóch kolejnych zgłoszeń,

τ_2 – czas obsługi jednego zgłoszenia przez stanowisko obsługi

S – liczba stanowisk,

R – liczebność miejsc w kolejce zgłoszeń oczekujących na obsługę.

Zastosowanie teorii masowej obsługi daje możliwość wyznaczenia następujących wielkości: liczba nieobsługiwanych obiektów, liczba zgłoszeń, czas oczekiwania dowolnego zgłoszenia na obsługę, współczynnik zajętości kanałów.²⁰²

²⁰² S. Niziński, tamże..., s. 305–306.

3. Podsumowanie części literaturowej

Analiza literatury dokonana w poprzednich rozdziałach wykazuje, iż pozyskiwanie energii z biomasy ma istotne, globalne znaczenie dla gospodarki i ekologii. Zainteresowanie procesami energetycznego wykorzystania biomasy można zaobserwować we wszystkich obszarach geograficznych, zarówno w krajach rozwiniętych przemysłowo, jak i w krajach rozwijających się, obydwu kategoriach, niezależnie od położenia w różnych strefach klimatycznych i panującego w nich systemu politycznego.

Główne argumenty przemawiające za wykorzystaniem biomasy, to z jednej strony względy ekologiczne, polegające na ograniczeniu emisji gazów cieplarnianych pochodzących z paliw kopalnych, jak i obawie przed wyczerpaniem, przynajmniej tych stosunkowo łatwo dostępnych kopalnych surowców energetycznych. Uwzględniane są również względy polityczne polegające na, przynajmniej częściowym, ekonomicznym i surowcowym uniezależnieniu się niektórych krajów od innych, będących dostawcami surowców energetycznych.

Wykorzystanie biomasy, jako jednego ze źródeł odnawialnych, wiąże się z szeroko zakrojonymi badaniami nad sposobami wykorzystania i technologiami konwersji biomasy w użyteczne źródło energii. Omawiane są różne procesy technologiczne i różne formy nośników energii pochodzących z biomasy. Są to zarówno paliwa gazowe, jak i paliwa stałe oraz ciekłe. Z każdym z nich wiąże się specyficzny rodzaj zastosowań oraz specyficzne technologie przetwarzania.

Podnoszone są również zagadnienia ekonomiczne – kwestie dotyczące opłacalności produkcji biopaliw oraz występowania konkurencji pomiędzy uprawami dedykowanymi do celów spożywczych, a tymi, przeznaczonymi do celów przemysłowych, w tym – do produkcji biopaliw. Konkurencja ta może prowadzić do zmniejszania podaży żywności. Wynika stąd, również dyskutowana, tendencja do energetycznego wykorzystywania odpadów z rolnictwa ukierunkowanego na produkcję żywności oraz przemysłu przetwórstwa spożywczego. Poważnie traktuje się również pozyskiwanie energii z biomasy będącej odpadem komunalnym.

Zamiar, przynajmniej częściowego, zastąpienia nieodnawialnych źródeł energii przez źródła odnawialne wiąże się również z pytaniem o efektywność energetyczną procesów. Wszystkie procesy produkcyjne, również te, występujące w produkcji biopaliw, zachodzą przy wykorzystaniu energii. Jeśli energia uzyskiwana z biopaliw ma, choćby częściowo, zastąpić energię pozyskiwaną z innych źródeł, zużycie energii w stosowanych procesach produkcyjnych musi być mniejsze od ilości energii uzyskiwanej z biopaliwa wyprodukowanego w tych procesach. Zagadnienie to omawiane jest w niewielu pracach, jedną z ważniejszych jest, omawiana wcześniej, praca dotycząca biomasy wierzbowej wykorzystywanej w Szwecji do spalania w elektrowniach. W pracy tej stworzono

model pozwalający na analizę opłacalności ekonomicznej oraz na ocenę dopuszczalnej odległości transportu biomasy w postaci zrębków wierzbowych. Zwrócono tu również uwagę na aspekt „zużycia” tzw. energii wbudowanej w urządzenia (zużytej w procesie wytwarzania tych urządzeń, a ulegającej „zużyciu” w miarę postępu eksploatacyjnego zużycia środka technicznego).

Brak systematycznych badań w zakresie efektywności energetycznej procesów wytwarzania biopaliw niewątpliwie, wskazuje na potrzebę i ważność podjęcia bardziej kompleksowych badań uwzględniających ilości energii zużywane w różnych procesach i na różnych, kolejnych etapach produkcji biopaliw.

Analiza zagadnień i metod zawartych w systemowym opisie zjawisk zachodzących podczas wytwarzania biopaliw wskazuje na szereg ważnych aspektów. Ważnym aspektem jest dostrzeżenie skuteczności modelowania matematycznego i komputerowego do analizy funkcjonowania systemów. Jedną z głównych konkluzji stanowi spostrzeżenie, iż system produkcyjny biopaliw może być podzielony na dwa podsystemy o zdecydowanie różnych charakterystykach i różnych strukturach. Są to podsystemy: agrotechniczny i industrialny (rolniczy i przemysłowy). Obydwa zawierają bardzo różne elementy i charakteryzują się występowaniem w nich zróżnicowanych oddziaływań i zróżnicowaniem zachodzących w nich procesów. Obydwa są jednak powiązane i wzajemnie oddziałują poprzez przekazywany surowiec i wymagania, przede wszystkim związane ze skalą produkcji.

Obecna praca poświęcona jest analizie efektywności energetycznej podsystemu rolnego, którego struktura jest uzależniona od wielkości popytu ze strony podsystemu przemysłowego. Zależność ta jest uwzględniana *implicite*, jedynie poprzez założenie, że wymuszone przez skalę podsystemu przemysłowego, podsystemy agrotechniczne muszą różnić się swą strukturą, która wpływa na ich efektywność.

Każdy z tych podsystemów ma inną charakterystykę czasową: w systemie agrotechnicznym zdolność produkcyjna wykazuje *periodyczność roczną* z krótkim okresem dostępności plonu oraz długimi okresami przygotowania i bezczynności, zaś podsystem industrialny w optymalnym przypadku powinien działać w sposób ciągły. Wiąże się to z koniecznością występowania procesów *buforowych* – magazynowania plonu, lub występowania *nieciągłości* (sezonowości) w działaniu podsystemu industrialnego stanowi to istotny aspekt oddziaływania podsystemu rolnego na podsystem industrialny. Występuje również konieczność transportowania plonu pomiędzy podsystemami. Ze względu na złożoną budowę biomasy pozyskiwanej z plantacji możliwe jest wystąpienie wielu wariantów jej wstępnego przetwarzania i transportu. Podsystem industrialny, z kolei, oddziałuje na podsystem agrotechniczny przede wszystkim poprzez skalę produkcji – oddziaływanie to objawia się w wielkości popytu na surowiec, co ma istotne znaczenie dla wielkości i struktury plantacji, stanowiących podstawowe elementy struktury podsystemu agrotechnicznego. Wraz ze wzrostem areалу plantacji następuje jej rozdrobnienie na oddzielne pola, odległe od siebie. Skutkiem

rozdrobienia jest wystąpienie konieczności transportowania środków produkcji pomiędzy polami i związany z tym wkład energii.

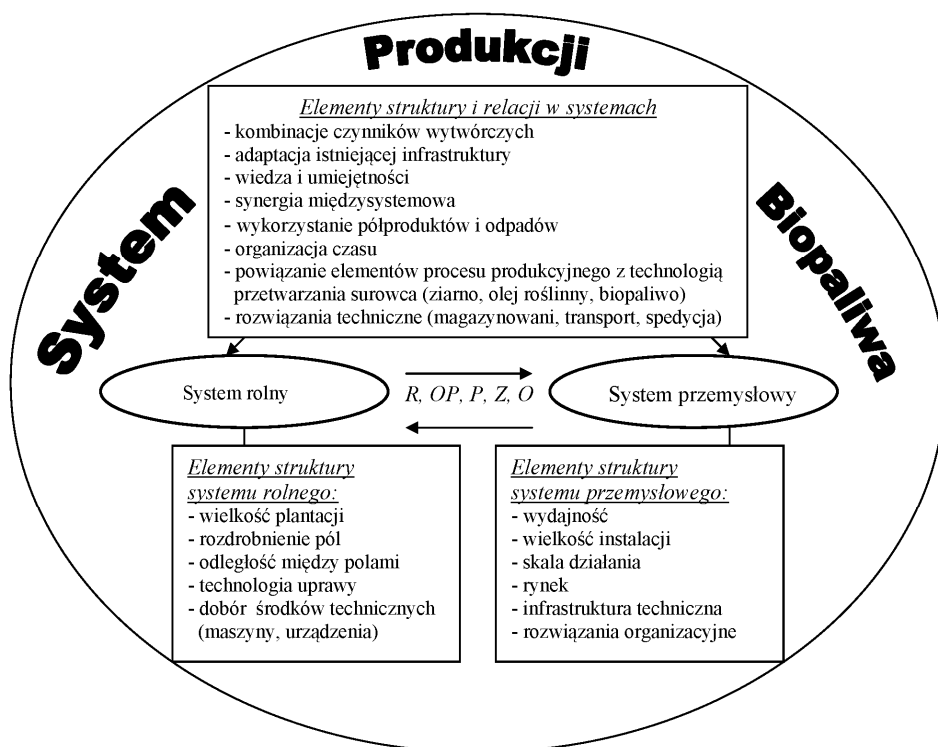
Badanie tej efektywności w dalszej części pracy będzie realizowane poprzez stworzenie modelu matematycznego i badanie jego zachowania przy założeniu danych wejściowych odpowiadających różnym, realistycznie dobranym, charakterystykom elementów struktury badanych wariantów podsystemu rolnego. Jako elementy struktury podsystemu rolnego przyjęte są wielkości plantacji, wielkości pól składających się na plantację, odległości pomiędzy tymi polami, odległość od bazy produkcyjnej, odległość od zakładu przetwórczego, charakterystyki techniczne maszyn i urządzeń oraz procedury technologiczne i organizacyjne.

II

Badania własne

4. Wprowadzenie do badań własnych

Badania nad efektywnością energetyczną mają istotne znaczenie, gdyż wkład energii niezbędny do wyprodukowania biopaliwa powinien być uznany za jedno z podstawowych kryteriów decydujących o doborze określonej technologii. Miernikiem może tu być stosunek wartości opałowej biopaliwa, wyrażonej jako ilość energii uzyskiwana z jednostki masy biopaliwa, do ilości energii zużytej na wszystkich etapach wytwarzania jednostki masy biopaliwa. Należy zwrócić uwagę, że w dotychczasowej literaturze nie przedstawiono kryteriów doboru technologii wytwarzania biopaliwa, uwzględniających potencjał surowcowy regionu, możliwości adaptacji istniejącej infrastruktury, aspekty ekologiczne, a przede wszystkim innowacyjność technologiczną rozpatrywanego procesu.



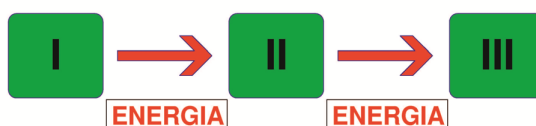
R – relacje, OP – operacje, P – procesy, Z – zakłócenia, O – otoczenie.

Rys. 35. Relacje w systemie produkcyjnym biopaliw

Źródło: opracowanie własne.

System produkcyjny biopaliw, ze względu na występowanie w nim surowca rolniczego, składa się z dwóch podsystemów (rolnego i przemysłowego) o bardzo zróżnicowanej technologii produkcji i wydajności, a także o bardzo zróżnicowanych charakterystykach czasowych wynikających m. in. z czynników środowiskowych (pory roku, klimat, itp.). Relacje pomiędzy tymi podsystemami schematycznie przedstawiono na rys. 35. W każdym z tych podsystemów występują procesy technologiczne składające się z szeregu procesów elementarnych, w których następuje powiązana konwersja masy i energii. Strumień masy podlega różnorodnym przekształceniom w kolejny półprodukt i odpad (o różnych możliwych wariantach dalszego przetworzenia). Na każdym etapie konieczne jest doprowadzenie energii, zaś w końcowym stadium produktem użytecznym jest energia zawarta w biopaliwie. Struktura systemu rozumiana jest jako układ elementów z ich wzajemnymi powiązaniami. Dobór elementarnych procesów technologicznych, z których każdy potencjalnie charakteryzuje się innym zapotrzebowaniem na energię i innym stosunkiem wytworzonego półproduktu do ewentualnego odpadu, składających się na tę strukturę decyduje o jej efektywności zarówno w sensie energetycznym, jak i ekonomicznym. W produkcji biopaliw zawsze występuje konieczność koordynacji pomiędzy dwoma podsystemami produkcyjnymi. Poszukiwanie synergii tych dwóch podsystemów jest zasadniczym warunkiem powodzenia zarówno z ekonomicznego, jak i technicznego punktu widzenia. Poniższy schemat ilustruje, że wytwarzanie biopaliw wiąże się z szeregiem zabiegów agrotechnicznych jak i przemysłowych. Każdy zabieg wymaga włożenia pewnego rodzaju energii i surowców.

ZABIEGI AGROTECHNICZNE



ZABIEGI PRZETWÓRCZE



Rys. 36. Wkłady energii niezbędne do prowadzenia kolejnych procesów w systemie produkcyjnym biopaliw

Źródło: opracowanie własne.

Skoro efektem finalnym ma być biopaliwo, to powstaje pytanie czy i przy spełnieniu jakich warunków jego produkcja jest korzystna z energetycznego punktu widzenia.

Analiza poszczególnych procesów elementarnych, ich właściwy dobór i dobór relacji pomiędzy nimi jest metodą prowadzącą do optymalizacji procesu.

Kolejnym czynnikiem jest zakładana wielkość, czyli skala, systemu produkcyjnego, mierzona przez wielkość produkcji. Złożoność relacji pomiędzy obydwooma podsystemami i zróżnicowanie uwarunkowań w jakich działają powoduje uzależnienie efektywności całego systemu od dopasowania jego części. Jest to problem wymagający przeanalizowania i rozstrzygnięcia.

Zakres zmiennych i oczekiwana dokładność modelu muszą odzwierciedlać ilościowe związki pomiędzy wielkościami techniczno-ekonomicznymi procesu. Są one wielkościami decyzyjnymi tzn. poddane zmianą się w określonych granicach mogą być przedmiotem badań optymalizacyjnych, w których przedmiotem wyboru jest technologia produkcji. Zmiana parametrów technologicznych decyduje o wielkości produkcji i o niezbędnej przepustowości urządzeń produkcyjnych. Uzyskanie optymalnego efektu można osiągnąć poprzez ustalenie odpowiednich parametrów modelowanego procesu. Jest to możliwe poprzez tworzenie modeli różnych wariantów procesu technologicznego przy różnych założeniach oraz wybór najkorzystniejszego z nich.²⁰³

Głównym wskaźnikiem stanowiącym podstawę rozważań obecnej pracy jest efektywność energetyczna procesów zachodzących w systemie produkcji biopaliw. Efektywność ta może być zdefiniowana jako stosunek:

$$\text{efektywność} = \frac{\text{suma energii uzyskanej w jednostce biopaliwa}}{\text{suma wkładów energii w procesy wytworzenia jednostki biopaliwa}}$$

Tak zdefiniowana efektywność jest odpowiednikiem znanego w literaturze wskaźnika EROEI (*energy return on energy investment*).²⁰⁴

Jak pokazano w dalszej części pracy wkłady te mogą być bardzo różne, a ich rola zależy od struktury badanego systemu produkcyjnego. Obok energii zużytej na przeprowadzenie operacji agrotechnicznych, których liczba i rodzaj także mogą się różnić, należy uwzględnić wpływ energii „wbudowanej” w urządzenia i środki produkcji – jej wkład zależy od technologii produkcji i rodzaju użytych

²⁰³ P. I. I. Börjesson, *Energy Analysis Of Biomass Production and Transportation*, [W:] Biomass and Bioenergy, vol. 11, no. 4, 1996, p. 305–318.

²⁰⁴ C.J. Cleveland, R. Constanza, C.A.S. Hall, R. Kaufmann, *Energy and the US economy: a biophysical perspective*, [W:] Science, vol. 225, 1984, p. 890–897; C.A.S. Hall, J.G. Lambert, S.B. Balogh, *EROI of different fuels and the implication for society*, [W:] Energy Policy, vol. 64, 2014, p. 141–152.

środków produkcji. Ponadto istnieje potrzeba uwzględnienia energii włożonej w transport środków produkcji pomiędzy polami – zależny od struktury plantacji i organizacji prac oraz energii niezbędnej do transportu plonów do przetwórci przemysłowej. Ten ostatni zależy od odległości plantacji od przetwórci oraz od sposobu organizacji zbioru i transportu plonów.

Należy również zwrócić uwagę, że tak zdefiniowana efektywność energetyczna nie jest tożsama ze sprawnością termodynamiczną systemu produkcyjnego. Sprawność zdefiniowana jest jako stosunek energii uzyskanej z systemu przetwarzania do wprowadzonej do tego systemu. W przypadku biopaliw należałoby w tej sytuacji jako energię doprowadzoną do systemu uwzględnić energię słoneczną, wykorzystaną przez biomasę w procesie wzrostu.

Efektywność energetyczna może więc być cechą charakteryzującą każdy indywidualny system produkcyjny wynikającą z jego struktury oraz stosowanych metod i organizacji pracy. Wszystkie te czynniki mogą być optymalizowane na podstawie ilościowego modelu opisującego badane zjawiska.

Przesłankami, które przemawiają za produkcją biopaliw, a wśród nich, estrów oleju rzepakowego, jako paliw silnikowych, są m.in.: ochrona środowiska, wykorzystanie zasobów naturalnych, warunki klimatyczne, sfera ekonomiczna, znaczenie fitosanitarne uprawianego rzepaku poprawiające zmianowanie (jako przedplon dla uprawy zbóż), modernizacja obszarów wiejskich, nowe źródła dochodu itd.

Obok produkcji w dużej skali przemysłowej, która jest głównym przedmiotem zainteresowania obecnej pracy, jednym z wariantów może być przetwarzanie rzepaku w niewielkich rafineriach. W indywidualnych gospodarstwach rolnych istnieje możliwość produkcji biodiesla na własny użytek.²⁰⁵ Realizacja produkcji w takiej skali możliwa jest przy stosowaniu prostego wyposażenia technicznego, łatwym dostępie do głównego surowca własnej produkcji i stawianiu niższych wymogów jakościowych w stosunku do paliwa. Produkcja ta również nie jest obciążona podatkiem akcyzowym. Produkcji na własny użytek dotyczy szereg ograniczenia, tj. zakaz stosowania biopaliwa w pojazdach transportu drogowego, limit produkcji, prowadzenie składu celnego, składanie okresowych sprawozdań z produkcji, co budzi niechęć rolników do prowadzenia takiej działalności. Dlatego konieczne są uproszczenia prawne.²⁰⁶

W polskim prawie dotychczasowe regulacje ukierunkowane na rynek biokomponentów i biopaliw ciekłych wprowadziły ustawy z dnia 25 sierpnia

²⁰⁵ O. A. Orynycz, *Produkcja biodiesla na własny użytek w gospodarstwie rolnym szansą na przezwyciężenie kryzysu*, [W:] *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, nr 231, 2012, s. 308–325.

²⁰⁶ F. Krawiec, *Odnawialne źródła energii w świetle globalnego kryzysu energetycznego*, Warszawa, Difin, 2010, s. 71–72.

2006 r.: *o systemie monitorowania i kontrolowania jakości paliw oraz o biokomponentach i biopaliwach ciekłych*.²⁰⁷

Wyżej wymienione ustawy umożliwiają rolnikom produkcję biopaliw ciekłych na własne potrzeby, a w przypadku oleju rzepakowego i estrów nie jest konieczne składanie zabezpieczenia akcyzowego. Zgodnie z wymogami roczny limit produkcji (bez sprzedaży lub zbywania w innej formie) samoistnego biopaliwa, przy wykorzystaniu własnych surowców i materiałów, na własne potrzeby wynosi 100 l/ha powierzchni użytków rolnych w gospodarstwie. Biorąc pod uwagę ochronę środowiska i zdrowie ludzi wytwarzane biopaliwa powinny spełniać minimalny próg jakościowy. Obserwacja upraw energetycznych skłoniła organy UE do modyfikacji istniejących norm prawnych. Gwarancją ekorozwoju są przyjęte dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady: 2009/28/WE, 2009/30/WE.²⁰⁸

Uprawa na własny użytek stanowi skrajny przypadek produkcji małej skali, przy której nie występują czynniki takie, jak transport pomiędzy odległymi polami, czy też transport do odległej przetwórci przemysłowej. Ocena efektywności energetycznej w tym przypadku może być szczególnie uproszczona i traktowana jako przypadek graniczny.

W załączniku zamieszczono analizę ekonomiczną procesu przetwarzania, rzepaku na biodiesel, na małą skalę dla własnych potrzeb gospodarstwa rolnego. Analiza ta wykazuje, że taki rodzaj produkcji może być opłacalny w odniesieniu do cen środków produkcji.

²⁰⁷ Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o systemie monitorowania i kontrolowania jakości paliw, Dz.U. 2006, nr 169, poz. 1200; Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o biokomponentach i biopaliwach ciekłych, Dz.U. 2006, nr 169, poz. 1199 z późn. zm.

²⁰⁸ O. A. Oryńcz, *Produkcja biodiesla na własny użytek w gospodarstwie rolnym szansą na przetrwanie w kryzysie*, [W:] Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, nr 231, 2012, s. 308–325.

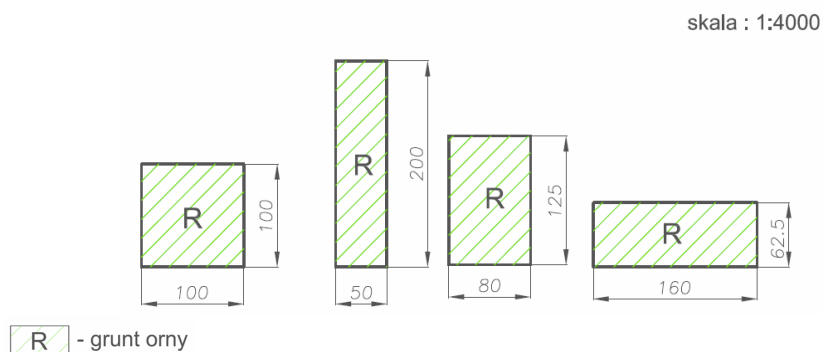
5. Analiza efektywności plantacji energetycznej w podsystemie rolnym

5.1. Analiza rzeczywistej plantacji

Uprawa roślin energetycznych wiąże się z koniecznością dokonywania szeregu operacji agrotechnicznych, z których każda wymaga zużycia energii – przede wszystkim w postaci paliwa płynnego do napędu maszyn rolniczych. Ilość zużytego paliwa na każdą z operacji zależy od pracochłonności danej technologii, długości trasy przebytej na uprawianym polu oraz czasu związanego z dojazdami.

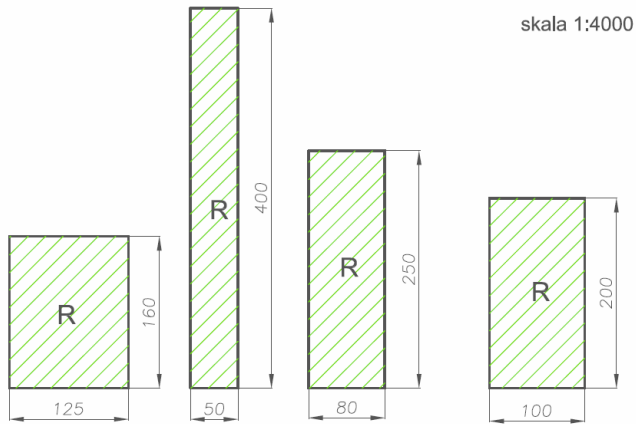
W dalszej części podrozdziału opisano dobór podstawowych maszyn i urządzeń rolniczych w technologii produkcji rzepaku. Przyjęto przykładowe warianty pól uprawnych 1,2,4,8,10 ha o różnym rozkładzie zmiennych a i b . Przedstawiono wybrane modele maszyn i urządzeń roboczych, w tym pługów, bron talezowych, polowych, rozrzutników obornika, siewników i kombajnów stosowanych w głównych zabiegach agrotechnicznych. Zwrócono uwagę na podstawowe charakterystyki techniczne maszyn tj. rodzaj, typ, szerokość roboczą czy ładowność.

Poniżej przedstawiono analizę zużycia energii podczas operacji agrotechnicznych wykonywanych przy użyciu wybranych typów sprzętu rolniczego. W analizie tej, dotyczącej uprawy rzepaku, zwrócono szczególną uwagę na długość drogi przebytej na polu podczas pracy.



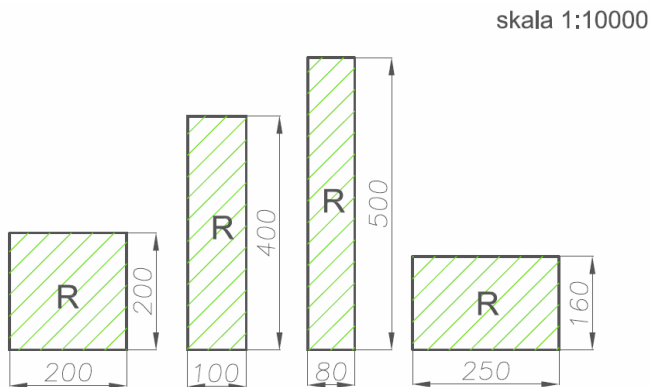
Rys. 37. Przykładowe warianty powierzchni pól 1 ha w [m]

Źródło: opracowanie własne.



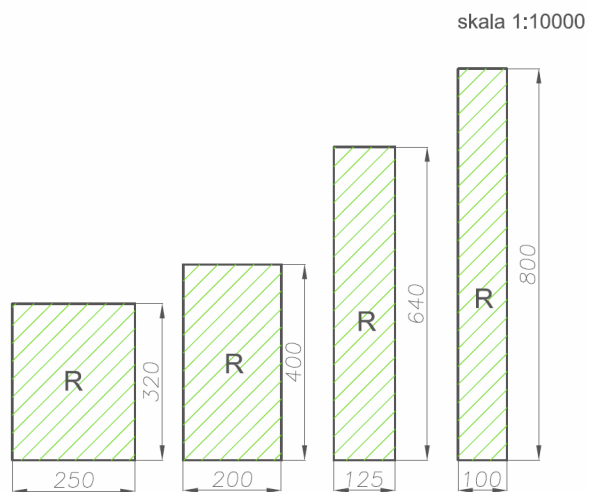
Rys. 38. Przykładowe warianty powierzchni pól 2 ha w [m]

Źródło: opracowanie własne.



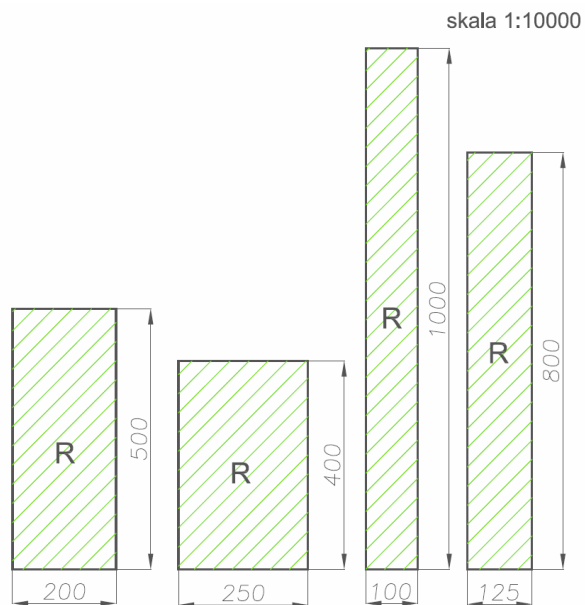
Rys. 39. Przykładowe warianty powierzchni pól 4 ha w [m]

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 40. Przykładowe warianty powierzchni pól 8 ha w [m]

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 41. Przykładowe warianty powierzchni pól 10 ha w [m]

Źródło: opracowanie własne.

Założmy, że gospodarstwa rolne do orki 1 ha, 2 ha, 4 ha, 8 ha, 10 ha używają plugów zagonowych dwu-, trój-, cztero- bądź pięcioskibowych o różnych szerokościach roboczych korpusów tj. 2×30 cm, 2×35 cm, 2×40 cm, 3×30 cm, 3×35 cm, 3×40 cm, 4×30 cm, 4×35 cm, 4×40 cm, 5×30 cm, 5×35 cm, 5×40 cm.

Tab. 28. Przebyte drogi na polu podczas orki 1 ha plugiem zagonowym dwuskbowym o różnych szerokościach roboczych korpusów

Pole 1 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 2x30 [m]	Droga na polu L _{2x30} [km]		Szer. pasa obróbki 2x35 [m]	Droga na polu L _{2x35} [km]		Szer. pasa obróbki 2x40 [m]	Droga na polu L _{2x40} [km]	
	a	b									
P ₁	100	100	0,6	L ₁	16,7	0,7	L ₁	14,3	0,8	L ₁	12,5
P ₂	200	50	0,6	L ₂	16,7	0,7	L ₂	14,3	0,8	L ₂	12,5
P ₃	125	80	0,6	L ₃	16,7	0,7	L ₃	14,3	0,8	L ₃	12,5
P ₄	62,5	160	0,6	L ₄	16,7	0,7	L ₄	14,3	0,8	L ₄	12,5

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Akpil”.

Tab. 29. Przebyte drogi na polu podczas orki 1 ha plugiem zagonowym trójskbowym o różnych szerokościach roboczych korpusów

Pole 1 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 3x30 [m]	Droga na polu L _{3x30} [km]		Szer. pasa obróbki 3x35 [m]	Droga na polu L _{3x35} [km]		Szer. pasa obróbki 3x40 [m]	Droga na polu L _{3x40} [km]	
	a	b									
P ₁	100	100	0,9	L ₁	11,1	1,05	L ₁	9,5	1,2	L ₁	8,3
P ₂	200	50	0,9	L ₂	11,1	1,05	L ₂	9,5	1,2	L ₂	8,3
P ₃	125	80	0,9	L ₃	11,1	1,05	L ₃	9,5	1,2	L ₃	8,3
P ₄	62,5	160	0,9	L ₄	11,1	1,05	L ₄	9,5	1,2	L ₄	8,3

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Akpil”.

Tab. 30. Przebyte drogi na polu podczas orki 1 ha plugiem zagonowym czteroskbowym o różnych szerokościach roboczych korpusów

Pole 1 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 4x30 [m]	Droga na polu L _{4x30} [km]		Szer. pasa obróbki 4x35 [m]	Droga na polu L _{4x35} [km]		Szer. pasa obróbki 4x40 [m]	Droga na polu L _{4x40} [km]	
	a	b									
P ₁	100	100	1,2	L ₁	8,3	1,4	L ₁	7,1	1,6	L ₁	6,3
P ₂	200	50	1,2	L ₂	8,3	1,4	L ₂	7,1	1,6	L ₂	6,3
P ₃	125	80	1,2	L ₃	8,3	1,4	L ₃	7,1	1,6	L ₃	6,3
P ₄	62,5	160	1,2	L ₄	8,3	1,4	L ₄	7,1	1,6	L ₄	6,3

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Akpil”.

Tab. 31. Przebyte drogi na polu podczas orki 1 ha plugiem zagonowym pięcioskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów

Pole 1 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 5x30 [m]	Droga na polu L _{5x30} [km]		Szer. pasa obróbki 5x35 [m]	Droga na polu L _{5x35} [km]		Szer. pasa obróbki 5x40 [m]	Droga na polu L _{5x40} [km]	
	a	b									
P ₁	100	100	1,5	L ₁	6,7	1,75	L ₁	5,7	2,0	L ₁	5,0
P ₂	200	50	1,5	L ₂	6,7	1,75	L ₂	5,7	2,0	L ₂	5,0
P ₃	125	80	1,5	L ₃	6,7	1,75	L ₃	5,7	2,0	L ₃	5,0
P ₄	62,5	160	1,5	L ₄	6,7	1,75	L ₄	5,7	2,0	L ₄	5,0

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Akpil”.

Tab. 32. Przebyte drogi na polu podczas orki 2 ha plugiem zagonowym dwuskbowym o różnych szerokościach roboczych korpusów

Pole 2 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 2x30 [m]	Droga na polu L _{2x30} [km]		Szer. pasa obróbki 2x35 [m]	Droga na polu L _{2x35} [km]		Szer. pasa obróbki 2x40 [m]	Droga na polu L _{2x40} [km]	
	a	b									
P ₁	160	125	0,6	L ₁	33,3	0,7	L ₁	28,6	0,8	L ₁	25
P ₂	400	50	0,6	L ₂	33,3	0,7	L ₂	28,6	0,8	L ₂	25
P ₃	250	80	0,6	L ₃	33,3	0,7	L ₃	28,6	0,8	L ₃	25
P ₄	200	100	0,6	L ₄	33,3	0,7	L ₄	28,6	0,8	L ₄	25

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Akpil”.

Tab. 33. Przebyte drogi na polu podczas orki 2 ha plugiem zagonowym trójskbowym o różnych szerokościach roboczych korpusów

Pole 2 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 3x30 [m]	Droga na polu L _{3x30} [km]		Szer. pasa obróbki 3x35 [m]	Droga na polu L _{3x35} [km]		Szer. pasa obróbki 3x40 [m]	Droga na polu L _{3x40} [km]	
	a	b									
P ₁	160	125	0,9	L ₁	22,2	1,05	L ₁	19,0	1,2	L ₁	16,7
P ₂	400	50	0,9	L ₂	22,2	1,05	L ₂	19,0	1,2	L ₂	16,7
P ₃	250	80	0,9	L ₃	22,2	1,05	L ₃	19,0	1,2	L ₃	16,7
P ₄	200	100	0,9	L ₄	22,2	1,05	L ₄	19,0	1,2	L ₄	16,7

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Akpil”.

Tab. 34. Przebyte drogi na polu podczas orki 2 ha plugiem zagonowym czteroskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów

Pole 2 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 4x30 [m]	Droga na polu L _{4x30} [km]		Szer. pasa obróbki 4x35 [m]	Droga na polu L _{4x35} [km]		Szer. pasa obróbki 4x40 [m]	Droga na polu L _{4x40} [km]	
	a	b									
P ₁	160	125	1,2	L ₁	16,7	1,4	L ₁	14,3	1,6	L ₁	12,5
P ₂	400	50	1,2	L ₂	16,7	1,4	L ₂	14,3	1,6	L ₂	12,5
P ₃	250	80	1,2	L ₃	16,7	1,4	L ₃	14,3	1,6	L ₃	12,5
P ₄	200	100	1,2	L ₄	16,7	1,4	L ₄	14,3	1,6	L ₄	12,5

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Akpil”.

Tab. 35. Przebyte drogi na polu podczas orki 2 ha plugiem zagonowym pięcioskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów

Pole 2 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 5x30 [m]	Droga na polu L _{5x30} [km]		Szer. pasa obróbki 5x35 [m]	Droga na polu L _{5x35} [km]		Szer. pasa obróbki 5x40 [m]	Droga na polu L _{5x40} [km]	
	a	b									
P ₁	160	125	1,5	L ₁	13,3	1,75	L ₁	11,4	2,0	L ₁	10
P ₂	400	50	1,5	L ₂	13,3	1,75	L ₂	11,4	2,0	L ₂	10
P ₃	250	80	1,5	L ₃	13,3	1,75	L ₃	11,4	2,0	L ₃	10
P ₄	200	100	1,5	L ₄	13,3	1,75	L ₄	11,4	2,0	L ₄	10

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Akpil”.

Tab. 36. Przebyte drogi na polu podczas orki 4 ha plugiem zagonowym dwuskbowym o różnych szerokościach roboczych korpusów

Pole 4 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 2x30 [m]	Droga na polu L _{2x30} [km]		Szer. pasa obróbki 2x35 [m]	Droga na polu L _{2x35} [km]		Szer. pasa obróbki 2x40 [m]	Droga na polu L _{2x40} [km]	
	a	b									
P ₁	200	200	0,6	L ₁	66,7	0,7	L ₁	57,1	0,8	L ₁	50
P ₂	400	100	0,6	L ₂	66,7	0,7	L ₂	57,1	0,8	L ₂	50
P ₃	500	80	0,6	L ₃	66,7	0,7	L ₃	57,1	0,8	L ₃	50
P ₄	160	250	0,6	L ₄	66,7	0,7	L ₄	57,1	0,8	L ₄	50

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Akpil”.

Tab. 37. Przebyte drogi na polu podczas orki 4 ha plugiem zagonowym trójskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów

Pole 4 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 3x30 [m]	Droga na polu L _{3x30} [km]		Szer. pasa obróbki 3x35 [m]	Droga na polu L _{3x35} [km]		Szer. pasa obróbki 3x40 [m]	Droga na polu L _{3x40} [km]	
	a	b									
P ₁	200	200	0,9	L ₁	44,4	1,05	L ₁	38,1	1,2	L ₁	33,3
P ₂	400	100	0,9	L ₂	44,4	1,05	L ₂	38,1	1,2	L ₂	33,3
P ₃	500	80	0,9	L ₃	44,4	1,05	L ₃	38,1	1,2	L ₃	33,3
P ₄	160	250	0,9	L ₄	44,4	1,05	L ₄	38,1	1,2	L ₄	33,3

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Akpil”.

Tab. 38. Przebyte drogi na polu podczas orki 4 ha plugiem zagonowym czteroskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów

Pole 4 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 4x30 [m]	Droga na polu L _{4x30} [km]		Szer. pasa obróbki 4x35 [m]	Droga na polu L _{4x35} [km]		Szer. pasa obróbki 4x40 [m]	Droga na polu L _{4x40} [km]	
	a	b									
P ₁	200	200	1,2	L ₁	33,3	1,4	L ₁	28,6	1,6	L ₁	25
P ₂	400	100	1,2	L ₂	33,3	1,4	L ₂	28,6	1,6	L ₂	25
P ₃	500	80	1,2	L ₃	33,3	1,4	L ₃	28,6	1,6	L ₃	25
P ₄	160	250	1,2	L ₄	33,3	1,4	L ₄	28,6	1,6	L ₄	25

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Akpil”.

Tab. 39. Przebyte drogi na polu podczas orki 4 ha plugiem zagonowym pięcioskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów

Pole 4 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 5x30 [m]	Droga na polu L _{5x30} [km]		Szer. pasa obróbki 5x35 [m]	Droga na polu L _{5x35} [km]		Szer. pasa obróbki 5x40 [m]	Droga na polu L _{5x40} [km]	
	a	b									
P ₁	200	200	1,5	L ₁	26,7	1,75	L ₁	22,6	2,0	L ₁	20
P ₂	400	100	1,5	L ₂	26,7	1,75	L ₂	22,6	2,0	L ₂	20
P ₃	500	80	1,5	L ₃	26,7	1,75	L ₃	22,6	2,0	L ₃	20
P ₄	160	250	1,5	L ₄	26,7	1,75	L ₄	22,6	2,0	L ₄	20

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Akpil”.

Tab. 40. Przebyte drogi na polu podczas orki 8 ha plugiem zagonowym 2wuskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów

Pole 8 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 2x30 [m]	Droga na polu L _{2x30} [km]		Szer. pasa obróbki 2x35 [m]	Droga na polu L _{2x35} [km]		Szer. pasa obróbki 2x40 [m]	Droga na polu L _{2x40} [km]	
	a	b									
P ₁	320	250	0,6	L ₁	133,3	0,7	L ₁	114,3	0,8	L ₁	100
P ₂	400	200	0,6	L ₂	133,3	0,7	L ₂	114,3	0,8	L ₂	100
P ₃	640	125	0,6	L ₃	133,3	0,7	L ₃	114,3	0,8	L ₃	100
P ₄	800	100	0,6	L ₄	133,3	0,7	L ₄	114,3	0,8	L ₄	100

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Akpil”.

Tab. 41. Przebyte drogi na polu podczas orki 8 ha plugiem zagonowym trójskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów

Pole 8 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 3x30 [m]	Droga na polu L _{3x30} [km]		Szer. pasa obróbki 3x35 [m]	Droga na polu L _{3x35} [km]		Szer. pasa obróbki 3x40 [m]	Droga na polu L _{3x40} [km]	
	a	b									
P ₁	320	250	0,9	L ₁	88,9	1,05	L ₁	76,2	1,2	L ₁	66,7
P ₂	400	200	0,9	L ₂	88,9	1,05	L ₂	76,2	1,2	L ₂	66,7
P ₃	640	125	0,9	L ₃	88,9	1,05	L ₃	76,2	1,2	L ₃	66,7
P ₄	800	100	0,9	L ₄	88,9	1,05	L ₄	76,2	1,2	L ₄	66,7

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Akpil”.

Tab. 42. Przebyte drogi na polu podczas orki 8 ha plugiem zagonowym czteroskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów

Pole 8 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 4x30 [m]	Droga na polu L _{4x30} [km]		Szer. pasa obróbki 4x35 [m]	Droga na polu L _{4x35} [km]		Szer. pasa obróbki 4x40 [m]	Droga na polu L _{4x40} [km]	
	a	b									
P ₁	320	250	1,2	L ₁	66,7	1,4	L ₁	57,1	1,6	L ₁	50
P ₂	400	200	1,2	L ₂	66,7	1,4	L ₂	57,1	1,6	L ₂	50
P ₃	640	125	1,2	L ₃	66,7	1,4	L ₃	57,1	1,6	L ₃	50
P ₄	800	100	1,2	L ₄	66,7	1,4	L ₄	57,1	1,6	L ₄	50

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Akpil”.

Tab. 43. Przebyte drogi na polu podczas orki 8 ha pługiem zagonowym pięcioskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów

Pole 8 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 5x30 [m]	Droga na polu L _{5x30} [km]		Szer. pasa obróbki 5x35 [m]	Droga na polu L _{5x35} [km]		Szer. pasa obróbki 5x40 [m]	Droga na polu L _{5x40} [km]	
	a	b									
P ₁	320	250	1,5	L ₁	53,3	1,75	L ₁	45,7	2,0	L ₁	40
P ₂	400	200	1,5	L ₂	53,3	1,75	L ₂	45,7	2,0	L ₂	40
P ₃	640	125	1,5	L ₃	53,3	1,75	L ₃	45,7	2,0	L ₃	40
P ₄	800	100	1,5	L ₄	53,3	1,75	L ₄	45,7	2,0	L ₄	40

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Akpil”.

Tab. 44. Przebyte drogi na polu podczas orki 10 ha pługiem zagonowym dwuskbowym o różnych szerokościach roboczych korpusów

Pole 10 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 2x30 [m]	Droga na polu L _{2x30} [km]		Szer. pasa obróbki 2x35 [m]	Droga na polu L _{2x35} [km]		Szer. pasa obróbki 2x40 [m]	Droga na polu L _{2x40} [km]	
	a	b									
P ₁	500	200	0,6	L ₁	166,7	0,7	L ₁	142,6	0,8	L ₁	125
P ₂	400	250	0,6	L ₂	166,7	0,7	L ₂	142,6	0,8	L ₂	125
P ₃	1000	100	0,6	L ₃	166,7	0,7	L ₃	142,6	0,8	L ₃	125
P ₄	800	125	0,6	L ₄	166,7	0,7	L ₄	142,6	0,8	L ₄	125

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Akpil”.

Tab. 45. Przebyte drogi na polu podczas orki 10 ha pługiem zagonowym trójskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów

Pole 10 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 3x30 [m]	Droga na polu L _{3x30} [km]		Szer. pasa obróbki 3x35 [m]	Droga na polu L _{3x35} [km]		Szer. pasa obróbki 3x40 [m]	Droga na polu L _{3x40} [km]	
	a	b									
P ₁	500	200	0,9	L ₁	111,1	1,05	L ₁	95,2	1,2	L ₁	83,3
P ₂	400	250	0,9	L ₂	111,1	1,05	L ₂	95,2	1,2	L ₂	83,3
P ₃	1000	100	0,9	L ₃	111,1	1,05	L ₃	95,2	1,2	L ₃	83,3
P ₄	800	125	0,9	L ₄	111,1	1,05	L ₄	95,2	1,2	L ₄	83,3

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Akpil”.

Tab. 46. Przebyte drogi na polu podczas orki 10 ha pługiem zagonowym czteroskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów

Pole 10 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 4x30 [m]	Droga na polu L _{4x30} [km]		Szer. pasa obróbki 4x35 [m]	Droga na polu L _{4x35} [km]		Szer. pasa obróbki 4x40 [m]	Droga na polu L _{4x40} [km]	
	a	b									
P ₁	500	200	1,2	L ₁	83,3	1,4	L ₁	71,4	1,6	L ₁	62,5
P ₂	400	250	1,2	L ₂	83,3	1,4	L ₂	71,4	1,6	L ₂	62,5
P ₃	1000	100	1,2	L ₃	83,3	1,4	L ₃	71,4	1,6	L ₃	62,5
P ₄	800	125	1,2	L ₄	83,3	1,4	L ₄	71,4	1,6	L ₄	62,5

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Akpil”.

Tab. 47. Przebyte drogi na polu podczas orki 10 ha pługiem zagonowym pięcioskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów

Pole 10 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 5x30 [m]	Droga na polu L _{5x30} [km]		Szer. pasa obróbki 5x35 [m]	Droga na polu L _{5x35} [km]		Szer. pasa obróbki 5x40 [m]	Droga na polu L _{5x40} [km]	
	a	b									
P ₁	500	200	1,5	L ₁	66,7	1,75	L ₁	57,1	2,0	L ₁	50
P ₂	400	250	1,5	L ₂	66,7	1,75	L ₂	57,1	2,0	L ₂	50
P ₃	1000	100	1,5	L ₃	66,7	1,75	L ₃	57,1	2,0	L ₃	50
P ₄	800	125	1,5	L ₄	66,7	1,75	L ₄	57,1	2,0	L ₄	50

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Akpil”.

Przypuśćmy, że gospodarstwa rolne do talerzowania 1 ha, 2 ha, 4 ha, 8 ha, 10 ha używają bron talerzowych dwu- lub czterowalcowych o różnej liczbie talerzy w sekcji.

Tab. 48. Przebyte drogi na polu podczas talerzowania 1 ha broną talerzową dwuwalcową o różnej liczbie talerzy w sekcji

Pole 1 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 2,0 [m] liczba talerzy 9	Droga na polu L _{2,0} [km]		Szer. pasa obróbki 2,2 [m] ilość talerzy 10	Droga na polu L _{2,2} [km]		Szer. pasa obróbki 2,4 [m] ilość talerzy 11	Droga na polu L _{2,4} [km]	
	a	b									
P ₁	100	100	2,0	L ₁	5,0	2,2	L ₁	4,5	2,4	L ₁	4,2
P ₂	200	50	2,0	L ₂	5,0	2,2	L ₂	4,5	2,4	L ₂	4,2
P ₃	125	80	2,0	L ₃	5,0	2,2	L ₃	4,5	2,4	L ₃	4,2
P ₄	62,5	160	2,0	L ₄	5,0	2,2	L ₄	4,5	2,4	L ₄	4,2

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Kamix”.

Tab. 49. Przebyte drogi na polu podczas talerzowania 1 ha broną talerzową czterowalcową o różnej liczbie talerzy w sekcji

Pole 1 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 2,7 [m] liczba talerzy 6	Droga na polu L _{2,7} [km]		Szer. pasa obróbki 3,15 [m] ilość talerzy 7	Droga na polu L _{3,15} [km]	
	a	b						
P ₁	100	100	2,7	L ₁	3,7	3,15	L ₁	3,2
P ₂	200	50	2,7	L ₂	3,7	3,15	L ₂	3,2
P ₃	125	80	2,7	L ₃	3,7	3,15	L ₃	3,2
P ₄	62,5	160	2,7	L ₄	3,7	3,15	L ₄	3,2

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Kamix”.

Tab. 50. Przebyte drogi na polu podczas talerzowania 2 ha broną talerzową dwuwalcową o różnej liczbie talerzy w sekcji

Pole 2 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 2,0 [m] liczba talerzy 9	Droga na polu L _{2,0} [km]		Szer. pasa obróbki 2,2 [m] ilość talerzy 10	Droga na polu L _{2,2} [km]		Szer. pasa obróbki 2,4 [m] ilość talerzy 11	Droga na polu L _{2,4} [km]	
	a	b									
P ₁	160	125	2,0	L ₁	10	2,2	L ₁	9,1	2,4	L ₁	8,3
P ₂	400	50	2,0	L ₂	10	2,2	L ₂	9,1	2,4	L ₂	8,3
P ₃	250	80	2,0	L ₃	10	2,2	L ₃	9,1	2,4	L ₃	8,3
P ₄	200	100	2,0	L ₄	10	2,2	L ₄	9,1	2,4	L ₄	8,3

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Kamix”.

Tab. 51. Przebyte drogi na polu podczas talerzowania 2 ha broną talerzową czterowalcową o różnej liczbie talerzy w sekcji

Pole 2 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 2,7 [m] liczba talerzy 6	Droga na polu L _{2,7} [km]		Szer. pasa obróbki 3,15 [m] ilość talerzy 7	Droga na polu L _{3,15} [km]	
	a	b						
P ₁	160	125	2,7	L ₁	7,4	3,15	L ₁	6,3
P ₂	400	50	2,7	L ₂	7,4	3,15	L ₂	6,3
P ₃	250	80	2,7	L ₃	7,4	3,15	L ₃	6,3
P ₄	200	100	2,7	L ₄	7,4	3,15	L ₄	6,3

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Kamix”.

Tab. 52. Przebyte drogi na polu podczas talerzowania 4 ha broną talerzową dwuwalcową o różnej liczbie talerzy w sekcji

Pole 4 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 2,0 [m] liczba talerzy 9	Droga na polu L _{2,0} [km]		Szer. pasa obróbki 2,2 [m] ilość tale- rzy 10	Droga na polu L _{2,2} km]		Szer. pasa obróbki 2,4 [m] ilość talerzy 11	Droga na polu L _{2,4} [km]	
	a	b									
P ₁	200	200	2,0	L ₁	20	2,2	L ₁	18,9	2,4	L ₁	16,7
P ₂	400	100	2,0	L ₂	20	2,2	L ₂	18,9	2,4	L ₂	16,7
P ₃	500	80	2,0	L ₃	20	2,2	L ₃	18,9	2,4	L ₃	16,7
P ₄	160	250	2,0	L ₄	20	2,2	L ₄	18,9	2,4	L ₄	16,7

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Kamix”.

Tab. 53. Przebyte drogi na polu podczas talerzowania 4 ha broną talerzową czterowalcową o różnej liczbie talerzy w sekcji

Pole 4 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 2,7 [m] liczba talerzy 6	Droga na polu L _{2,7} [km]		Szer. pasa obróbki 3,15 [m] ilość talerzy 7	Droga na polu L _{3,15} [km]	
	a	b						
P ₁	200	200	2,7	L ₁	14,8	3,15	L ₁	12,7
P ₂	400	100	2,7	L ₂	14,8	3,15	L ₂	12,7
P ₃	500	80	2,7	L ₃	14,8	3,15	L ₃	12,7
P ₄	160	250	2,7	L ₄	14,8	3,15	L ₄	12,7

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Kamix”.

Tab. 54. Przebyte drogi na polu podczas talerzowania 8 ha broną talerzową dwuwalcową o różnej liczbie talerzy w sekcji

Pole 8 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 2,0 [m] liczba talerzy 9	Droga na polu L _{2,0} [km]		Szer. pasa obróbki 2,2 [m] ilość tale- rzy 10	Droga na polu L _{2,2} km]		Szer. pasa obróbki 2,4 [m] ilość talerzy 11	Droga na polu L _{2,4} [km]	
	a	b									
P ₁	320	250	2,0	L ₁	40	2,2	L ₁	36,4	2,4	L ₁	33,3
P ₂	400	200	2,0	L ₂	40	2,2	L ₂	36,4	2,4	L ₂	33,3
P ₃	640	125	2,0	L ₃	40	2,2	L ₃	36,4	2,4	L ₃	33,3
P ₄	800	100	2,0	L ₄	40	2,2	L ₄	36,4	2,4	L ₄	33,3

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Kamix”.

Tab. 55. Przebyte drogi na polu podczas talerzowania 8 ha broną talerzową czterowalcową o różnej liczbie talerzy w sekcji

Pole 8 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 2,7 [m] liczba talerzy 6	Droga na polu L _{2,7} [km]		Szer. pasa obróbki 3,15 [m] ilość talerzy 7	Droga na polu L _{3,15} [km]	
	a	b						
P ₁	320	250	2,7	L ₁	29,6	3,15	L ₁	25,4
P ₂	400	200	2,7	L ₂	29,6	3,15	L ₂	25,4
P ₃	640	125	2,7	L ₃	29,6	3,15	L ₃	25,4
P ₄	800	100	2,7	L ₄	29,6	3,15	L ₄	25,4

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Kamix”.

Tab. 56. Przebyte drogi na polu podczas talerzowania 10 ha broną talerzową dwuwalcową o różnej liczbie talerzy w sekcji

Pole 10 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 2,0 [m] liczba talerzy 9	Droga na polu L _{2,0} [km]		Szer. pasa obróbki 2,2 [m] ilość talerzy 10	Droga na polu L _{2,2} [km]		Szer. pasa obróbki 2,4 [m] ilość talerzy 11	Droga na polu L _{2,4} [km]	
	a	b									
P ₁	500	200	2,0	L ₁	50	2,2	L ₁	45,5	2,4	L ₁	41,7
P ₂	400	250	2,0	L ₂	50	2,2	L ₂	45,5	2,4	L ₂	41,7
P ₃	1000	100	2,0	L ₃	50	2,2	L ₃	45,5	2,4	L ₃	41,7
P ₄	800	125	2,0	L ₄	50	2,2	L ₄	45,5	2,4	L ₄	41,7

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Kamix”.

Tab. 57. Przebyte drogi na polu podczas talerzowania 10 ha broną talerzową czterowalcową o różnej liczbie talerzy w sekcji

Pole 10 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 2,7 [m] liczba talerzy 6	Droga na polu L _{2,7} [km]		Szer. pasa obróbki 3,15 [m] ilość talerzy 7	Droga na polu L _{3,15} [km]	
	a	b						
P ₁	500	200	2,7	L ₁	37	3,15	L ₁	31,7
P ₂	400	250	2,7	L ₂	37	3,15	L ₂	31,7
P ₃	1000	100	2,7	L ₃	37	3,15	L ₃	31,7
P ₄	800	125	2,7	L ₄	37	3,15	L ₄	31,7

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Kamix”.

Przykładowo do bronowania 1 ha, 2 ha, 4 ha, 8 ha, 10 ha w gospodarstwach rolnych używane są brony trój-, cztero-, pięciopolowe o różnych szerokościach roboczych.

Tab. 58. Przebyte drogi na polu podczas bronowania 1 ha broną polową o różnych szerokościach roboczych

Pole 1 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 3,0 [m]	Droga na polu L _{3,0} [km]		Szer. pasa obróbki 3,8 [m]	Droga na polu L _{3,8} [km]		Szer. pasa obróbki 5,2 [m]	Droga na polu L _{5,2} [km]	
	a	b									
P ₁	100	100	3,0	L ₁	3,3	3,8	L ₁	2,6	5,2	L ₁	1,9
P ₂	200	50	3,0	L ₂	3,3	3,8	L ₂	2,6	5,2	L ₂	1,9
P ₃	125	80	3,0	L ₃	3,3	3,8	L ₃	2,6	5,2	L ₃	1,9
P ₄	62,5	160	3,0	L ₄	3,3	3,8	L ₄	2,6	5,2	L ₄	1,9

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Premium Trade”.

Tab. 59. Przebyte drogi na polu podczas bronowania 2 ha broną polową o różnych szerokościach roboczych

Pole 2 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 3,0 [m]	Droga na polu L _{3,0} [km]		Szer. pasa obróbki 3,8 [m]	Droga na polu L _{3,8} [km]		Szer. pasa obróbki 5,2 [m]	Droga na polu L _{5,2} [km]	
	a	b									
P ₁	160	125	3,0	L ₁	6,7	3,8	L ₁	5,3	5,2	L ₁	3,8
P ₂	400	50	3,0	L ₂	6,7	3,8	L ₂	5,3	5,2	L ₂	3,8
P ₃	250	80	3,0	L ₃	6,7	3,8	L ₃	5,3	5,2	L ₃	3,8
P ₄	200	100	3,0	L ₄	6,7	3,8	L ₄	5,3	5,2	L ₄	3,8

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Premium Trade”.

Tab. 60. Przebyte drogi na polu podczas bronowania 4 ha broną polową o różnych szerokościach roboczych

Pole 4 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 3,0 [m]	Droga na polu L _{3,0} [km]		Szer. pasa obróbki 3,8 [m]	Droga na polu L _{3,8} [km]		Szer. pasa obróbki 5,2 [m]	Droga na polu L _{5,2} [km]	
	a	b									
P ₁	200	200	3,0	L ₁	13,3	3,8	L ₁	10,5	5,2	L ₁	7,7
P ₂	400	100	3,0	L ₂	13,3	3,8	L ₂	10,5	5,2	L ₂	7,7
P ₃	500	80	3,0	L ₃	13,3	3,8	L ₃	10,5	5,2	L ₃	7,7
P ₄	160	250	3,0	L ₄	13,3	3,8	L ₄	10,5	5,2	L ₄	7,7

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Premium Trade”.

Tab. 61. Przebyte drogi na polu podczas bronowania 8 ha broną polową o różnych szerokościach roboczych

Pole 8 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 3,0 [m]	Droga na polu L _{3,0} [km]		Szer. pasa obróbki 3,8 [m]	Droga na polu L _{3,8} km]		Szer. pasa obróbki 5,2 [m]	Droga na polu L _{5,2} [km]	
	a	b									
P ₁	320	250	3,0	L ₁	26,7	3,8	L ₁	21,1	5,2	L ₁	15,4
P ₂	400	200	3,0	L ₂	26,7	3,8	L ₂	21,1	5,2	L ₂	15,4
P ₃	640	125	3,0	L ₃	26,7	3,8	L ₃	21,1	5,2	L ₃	15,4
P ₄	800	100	3,0	L ₄	26,7	3,8	L ₄	21,1	5,2	L ₄	15,4

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Premium Trade”.

Tab. 62. Przebyte drogi na polu podczas bronowania 10 ha broną polową o różnych szerokościach roboczych

Pole 10 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 3,0 [m]	Droga na polu L _{3,0} [km]		Szer. pasa obróbki 3,8 [m]	Droga na polu L _{3,8} km]		Szer. pasa obróbki 5,2 [m]	Droga na polu L _{5,2} [km]	
	a	b									
P ₁	500	200	3,0	L ₁	33,3	3,8	L ₁	26,3	5,2	L ₁	19,2
P ₂	400	250	3,0	L ₂	33,3	3,8	L ₂	26,3	5,2	L ₂	19,2
P ₃	1000	100	3,0	L ₃	33,3	3,8	L ₃	26,3	5,2	L ₃	19,2
P ₄	800	125	3,0	L ₄	33,3	3,8	L ₄	26,3	5,2	L ₄	19,2

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Premium Trade”.

Do rozrzucania obornika na powierzchni 1 ha, 2 ha, 4 ha, 8 ha, 10 ha można użyć rozrzutników o różnych szerokościach roboczych i ładownościach.

Tab. 63. Przebyte drogi na polu podczas rozrzucania obornika na 1 ha rozrzutnikami o różnych szerokościach roboczych

Pole 1 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 1,8 [m] (ładowność 2,5; 3,0; 3,5; 4,0 t)	Droga na polu L _{1,8} [km]		Szer. pasa obróbki 2,0 [m] (ładowność 6,0; 8,0t)	Droga na polu L _{2,0} km]	
	a	b						
P ₁	100	100	1,8	L ₁	5,6	2,0	L ₁	5,0
P ₂	200	50	1,8	L ₂	5,6	2,0	L ₂	5,0
P ₃	125	80	1,8	L ₃	5,6	2,0	L ₃	5,0
P ₄	62,5	160	1,8	L ₄	5,6	2,0	L ₄	5,0

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Premium Trade”.

Tab. 64. Przebyte drogi na polu podczas rozrzucania obornika na 2 ha rozrzutnikami o różnych szerokościach roboczych

Pole 2 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 1,8 [m] (ładowność 2,5; 3,0; 3,5; 4,0 t)	Droga na polu L _{1,8} [km]		Szer. pasa obróbki 2,0 [m] (ładowność 6,0; 8,0t)	Droga na polu L _{2,0} km]	
	a	b						
P ₁	160	125	1,8	L ₁	11,1	2,0	L ₁	10
P ₂	400	50	1,8	L ₂	11,1	2,0	L ₂	10
P ₃	250	80	1,8	L ₃	11,1	2,0	L ₃	10
P ₄	200	100	1,8	L ₄	11,1	2,0	L ₄	10

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Premium Trade”.

Tab. 65. Przebyte drogi na polu podczas rozrzucania obornika na 4 ha rozrzutnikami o różnych szerokościach roboczych

Pole 4 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 1,8 [m] (ładowność 2,5; 3,0; 3,5; 4,0 t)	Droga na polu L _{1,8} [km]		Szer. pasa obróbki 2,0 [m] (ładowność 6,0; 8,0t)	Droga na polu L _{2,0} km]	
	a	b						
P ₁	200	200	1,8	L ₁	22,2	2,0	L ₁	20
P ₂	400	100	1,8	L ₂	22,2	2,0	L ₂	20
P ₃	500	80	1,8	L ₃	22,2	2,0	L ₃	20
P ₄	160	250	1,8	L ₄	22,2	2,0	L ₄	20

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Premium Trade”.

Tab. 66. Przebyte drogi na polu podczas rozrzucania obornika na 8 ha rozrzutnikami o różnych szerokościach roboczych

Pole 8 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 1,8 [m] (ładowność 2,5; 3,0; 3,5; 4,0 t)	Droga na polu L _{1,8} [km]		Szer. pasa obróbki 2,0 [m] (ładowność 6,0; 8,0t)	Droga na polu L _{2,0} km]	
	a	b						
P ₁	320	250	1,8	L ₁	44,4	2,0	L ₁	40
P ₂	400	200	1,8	L ₂	44,4	2,0	L ₂	40
P ₃	640	125	1,8	L ₃	44,4	2,0	L ₃	40
P ₄	800	100	1,8	L ₄	44,4	2,0	L ₄	40

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Premium Trade”.

Tab. 67. Przebyte drogi na polu podczas rozrzucania obornika na 10 ha rozrzutnikami o różnych szerokościach roboczych

Pole 10 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 1,8 [m] (ładowność 2,5; 3,0; 3,5; 4,0 t)	Droga na polu L _{1,8} [km]		Szer. pasa obróbki 2,0 [m] (ładowność 6,0; 8,0t)	Droga na polu L _{2,0} [km]	
	a	b						
P ₁	500	200	1,8	L ₁	55,6	2,0	L ₁	50
P ₂	400	250	1,8	L ₂	55,6	2,0	L ₂	50
P ₃	1000	100	1,8	L ₃	55,6	2,0	L ₃	50
P ₄	800	125	1,8	L ₄	55,6	2,0	L ₄	50

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Premium Trade”.

Przykładowo w gospodarstwie do obsiewania 1 ha, 2 ha, 4 ha, 8 ha, 10 ha można zastosować siewniki o różnych szerokościach roboczych.

Tab. 68. Przebyte drogi na polu podczas obsiewania 1 ha siewnikami o różnych szerokościach roboczych

Pole 1 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 2,5 [m]	Droga na polu L _{2,5} [km]		Szer. pasa obróbki 3,0 [m]	Droga na polu L _{3,0} [km]	
	a	b						
P ₁	100	100	2,5	L ₁	4,0	3,0	L ₁	3,3
P ₂	200	50	2,5	L ₂	4,0	3,0	L ₂	3,3
P ₃	125	80	2,5	L ₃	4,0	3,0	L ₃	3,3
P ₄	62,5	160	2,5	L ₄	4,0	3,0	L ₄	3,3

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Kamix”.

Tab. 69. Przebyte drogi na polu podczas obsiewania 2 ha siewnikami o różnych szerokościach roboczych

Pole 2 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 2,5 [m]	Droga na polu L _{2,5} [km]		Szer. pasa obróbki 3,0 [m]	Droga na polu L _{3,0} [km]	
	a	b						
P ₁	160	125	2,5	L ₁	8,0	3,0	L ₁	6,7
P ₂	400	50	2,5	L ₂	8,0	3,0	L ₂	6,7
P ₃	250	80	2,5	L ₃	8,0	3,0	L ₃	6,7
P ₄	200	100	2,5	L ₄	8,0	3,0	L ₄	6,7

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Kamix”.

Tab. 70. Przebyte drogi na polu podczas obsiewania 4 ha siewnikami o różnych szerokościach roboczych

Pole 4 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 2,5 [m]	Droga na polu L _{2,5} [km]		Szer. pasa obróbki 3,0 [m]	Droga na polu L _{3,0} [km]	
	a	b						
P ₁	200	200	2,5	L ₁	16	3,0	L ₁	13,3
P ₂	400	100	2,5	L ₂	16	3,0	L ₂	13,3
P ₃	500	80	2,5	L ₃	16	3,0	L ₃	13,3
P ₄	160	250	2,5	L ₄	16	3,0	L ₄	13,3

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Kamix”.

Tab. 71. Przebyte drogi na polu podczas obsiewania 8 ha siewnikami o różnych szerokościach roboczych

Pole 8 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 2,5 [m]	Droga na polu L _{2,5} [km]		Szer. pasa obróbki 3,0 [m]	Droga na polu L _{3,0} [km]	
	a	b						
P ₁	320	250	2,5	L ₁	32	3,0	L ₁	26,7
P ₂	400	200	2,5	L ₂	32	3,0	L ₂	26,7
P ₃	640	125	2,5	L ₃	32	3,0	L ₃	26,7
P ₄	800	100	2,5	L ₄	32	3,0	L ₄	26,7

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Kamix”.

Tab. 72. Przebyte drogi na polu podczas obsiewania 10 ha siewnikami o różnych szerokościach roboczych

Pole 10 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki 2,5 [m]	Droga na polu L _{2,5} [km]		Szer. pasa obróbki 3,0 [m]	Droga na polu L _{3,0} [km]	
	a	b						
P ₁	500	200	2,5	L ₁	40	3,0	L ₁	33,3
P ₂	400	250	2,5	L ₂	40	3,0	L ₂	33,3
P ₃	1000	100	2,5	L ₃	40	3,0	L ₃	33,3
P ₄	800	125	2,5	L ₄	40	3,0	L ₄	33,3

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Kamix”.

Do zbioru nasion rzepaku z 1 ha, 2 ha, 4 ha, 8 ha, 10 ha można użyć kombajny o różnych szerokościach roboczych przyrządów żniwnych (headerów).

Tab. 73. Przebyte drogi na polu podczas koszenia 1 ha kombajnami o różnych szerokościach roboczych przyrządów żniwnych

Pole 1 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki hedera 4,2 [m]	Droga na polu L _{4,2} [km]		Szer. pasa obróbki hedera 4,8 [m]	Droga na polu L _{4,8} [km]		Szer. pasa obróbki hedera 5,4 [m]	Droga na polu L _{5,4} [km]	
	a	b									
P ₁	100	100	4,2	L ₁	2,4	4,8	L ₁	2,1	5,4	L ₁	1,9
P ₂	200	50	4,2	L ₂	2,4	4,8	L ₂	2,1	5,4	L ₂	1,9
P ₃	125	80	4,2	L ₃	2,4	4,8	L ₃	2,1	5,4	L ₃	1,9
P ₄	62,5	160	4,2	L ₄	2,4	4,8	L ₄	2,1	5,4	L ₄	1,9

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Korbanek”.

Tab. 74. Przebyte drogi na polu podczas koszenia 2 ha kombajnami o różnych szerokościach roboczych przyrządów żniwnych

Pole 2 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki hedera 4,2 [m]	Droga na polu L _{4,2} [km]		Szer. pasa obróbki hedera 4,8 [m]	Droga na polu L _{4,8} [km]		Szer. pasa obróbki hedera 5,4 [m]	Droga na polu L _{5,4} [km]	
	a	b									
P ₁	160	125	4,2	L ₁	4,8	4,8	L ₁	4,2	5,4	L ₁	3,7
P ₂	400	50	4,2	L ₂	4,8	4,8	L ₂	4,2	5,4	L ₂	3,7
P ₃	250	80	4,2	L ₃	4,8	4,8	L ₃	4,2	5,4	L ₃	3,7
P ₄	200	100	4,2	L ₄	4,8	4,8	L ₄	4,2	5,4	L ₄	3,7

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Korbanek”.

Tab. 75. Przebyte drogi na polu podczas koszenia 4 ha kombajnami o różnych szerokościach roboczych przyrządów żniwnych

Pole 4 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki hedera 4,2 [m]	Droga na polu L _{4,2} [km]		Szer. pasa obróbki hedera 4,8 [m]	Droga na polu L _{4,8} [km]		Szer. pasa obróbki hedera 5,4 [m]	Droga na polu L _{5,4} [km]	
	a	b									
P ₁	200	200	4,2	L ₁	9,5	4,8	L ₁	8,3	5,4	L ₁	7,4
P ₂	400	100	4,2	L ₂	9,5	4,8	L ₂	8,3	5,4	L ₂	7,4
P ₃	500	80	4,2	L ₃	9,5	4,8	L ₃	8,3	5,4	L ₃	7,4
P ₄	160	250	4,2	L ₄	9,5	4,8	L ₄	8,3	5,4	L ₄	7,4

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Korbanek”.

Tab. 76. Przebyte drogi na polu podczas koszenia 8 ha kombajnami o różnych szerokościach roboczych przyrządów żniwnych

Pole 8 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki hedera 4,2 [m]	Droga na polu L _{4,2} [km]		Szer. pasa obróbki hedera 4,8 [m]	Droga na polu L _{4,8} [km]		Szer. pasa obróbki hedera 5,4 [m]	Droga na polu L _{5,4} [km]	
	a	b									
P ₁	320	250	4,2	L ₁	19	4,8	L ₁	16,7	5,4	L ₁	14,8
P ₂	400	200	4,2	L ₂	19	4,8	L ₂	16,7	5,4	L ₂	14,8
P ₃	640	125	4,2	L ₃	19	4,8	L ₃	16,7	5,4	L ₃	14,8
P ₄	800	100	4,2	L ₄	19	4,8	L ₄	16,7	5,4	L ₄	14,8

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Korbanek”.

Tab. 77. Przebyte drogi na polu podczas koszenia 10 ha kombajnami o różnych szerokościach roboczych przyrządów żniwnych

Pole 10 ha	Zmienne pola [m]		Szer. pasa obróbki hedera 4,2 [m]	Droga na polu L _{4,2} [km]		Szer. pasa obróbki hedera 4,8 [m]	Droga na polu L _{4,8} [km]		Szer. pasa obróbki hedera 5,4 [m]	Droga na polu L _{5,4} [km]	
	a	b									
P ₁	500	200	4,2	L ₁	23,8	4,8	L ₁	20,8	5,4	L ₁	18,5
P ₂	400	250	4,2	L ₂	23,8	4,8	L ₂	20,8	5,4	L ₂	18,5
P ₃	1000	100	4,2	L ₃	23,8	4,8	L ₃	20,8	5,4	L ₃	18,5
P ₄	800	125	4,2	L ₄	23,8	4,8	L ₄	20,8	5,4	L ₄	18,5

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z katalogu firmy „Korbanek”.

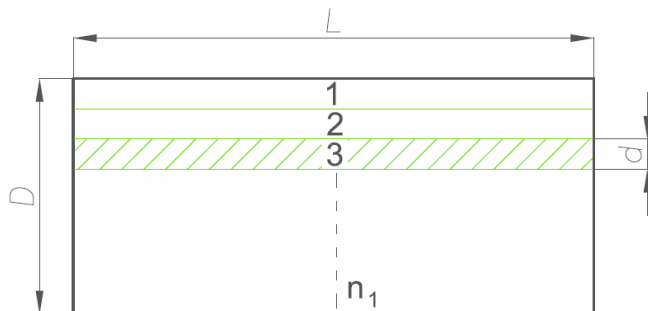
Z powyższych tabel można wywnioskować, że droga przebyta podczas realizacji operacji agrotechnicznych nie zależy od wymiarów pola, a jedynie od jego powierzchni i szerokości pasa obróbki.

Przeprowadzone powyżej rozważania można w następujący sposób uogólnić. Każda maszyna może obrobić w pojedynczym przebiegu określoną konstrukcyjnie szerokość pola. Całość powierzchni pola jest obrabiana poprzez ruch maszyny w równoległych pasach. W przypadku pola o kształcie prostokątnym o długości L i szerokości D , a więc powierzchni $A = LD$, liczba przebiegów koniecznych do pokrycia całej powierzchni wynosi:

1. w przypadku pasów o szerokości d równoległych do długości pola:

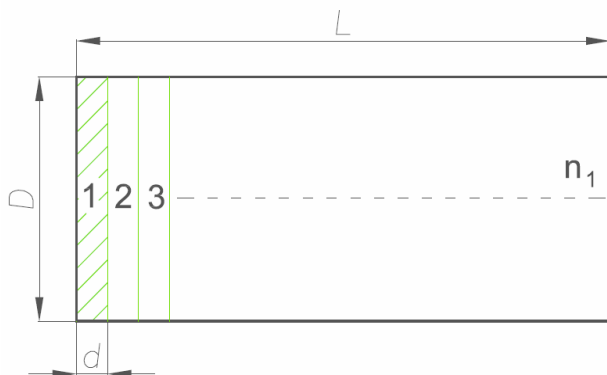
$$\eta_1 = \frac{D}{d} = \frac{L \times D}{L \times d} = \frac{A}{a_1} \quad (1)$$

czyli jest równa stosunkowi szerokości pola do szerokości pasa obróbki, lub stosunkowi powierzchni obrabianego pola do powierzchni pojedynczego pasa obróbki $a_1 = Ld$



2. w przypadku pasów równoległych do szerokości pola:

$$n_2 = \frac{L}{d} = \frac{L \times D}{D \times d} = \frac{A}{a_2} \quad (2)$$



Długość przebytej drogi jest w pierwszym przypadku równa:

$$Dr_1 = n_1 \times L = \frac{D}{d} \times L \quad (3)$$

zaś w drugim:

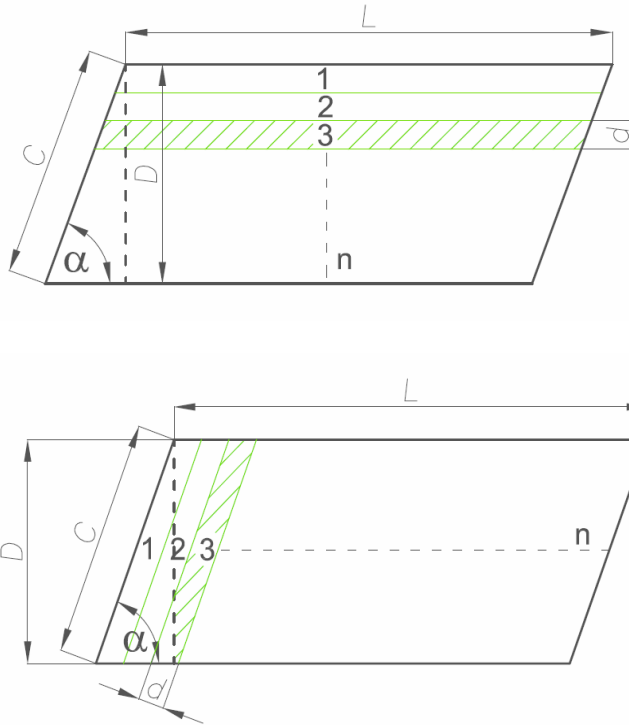
$$Dr_2 = n_2 \times D = \frac{L}{d} \times D \quad (4)$$

czyli obydwa warianty wiążą się z przebyciem tej samej drogi, a więc i tym samym zużyciem energii.

Jeśli pole ma kształt równoległoboku o długości L i szerokości D , to jego powierzchnia $A_2 = LD$, zaś ukośny bok ma długość:

$$C = \frac{D}{\sin \alpha} \quad (5)$$

W takim przypadku maszyna poruszająca się wzdłuż długości pola przy pojedynczym przebiegu obrabia fragment o powierzchni $a_1 = Ld$, a liczba koniecznych do przebycia pasów wynosi n_1 , tak jak w przypadku prostokąta (równ. 1).



Maszyna poruszająca się wzdłuż boku C , obrabiając fragment o szerokości d , przy jednorazowym przebiegu pokryje powierzchnię:

$$a_3 = C \times d = \frac{D \times d}{\sin \alpha} \quad (6)$$

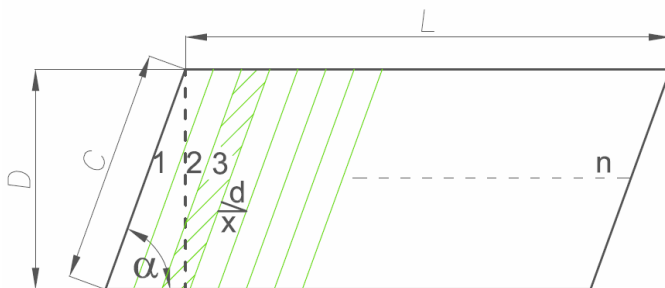
zaś liczba przebiegów wyniesie:

$$n_3 = \frac{L \sin \alpha}{d} \quad (7)$$

Przebyta droga wyniesie więc:

$$Dr_3 = n_3 \times C = \frac{L \sin \alpha}{d} \times \frac{D}{\sin \alpha} = \frac{LD}{d} \quad (8)$$

W tym więc przypadku przebyta droga również nie zależy od wybranego kierunku jazdy.



Ilość energii zużytej w procesach agrotechnicznych wyniesie więc

$$E_{zuż} = \sum_{i=1}^m \frac{L \times D}{d_i} \times \omega_i \times W_{pal} \quad (9)$$

co po wyciągnięciu stałych przed znak sumy przyjmuje postać:

$$E_{zuż} = W_{pal} \times A \times \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i}{d_i} \quad (10)$$

gdzie:

ω_i – zużycie paliwa na jednostkę przebytej drogi w i -tym zabiegu agrotechnicznym,

W_{pal} – wartość opałowa paliwa (kopalnego lub biopaliwa),

m – liczba operacji agrotechnicznych (w każdej z i operacji szerokość obrabianego pola d_i oraz jednostkowe zużycie paliwa ω_i – mogą być różne.

Efektywność energetyczna jest, zazwyczaj, definiowana jako stosunek energii otrzymanego produktu końcowego np. biopaliwa do sumy energii na wszystkich etapach produkcji. Definicja ta jest jednak często rozumiana w dwuznaczny sposób. Wątpliwości dotyczą czynników uwzględnianych w obliczeniach. Czynniki te mogą być bezpośrednio użyte do konkretnego etapu konwersji, jak również pośrednio związane z daną technologią w odniesieniu do systemu produkcyjnego jako całości. W niniejszej pracy przedstawiono różne możliwości użycia czynników bezpośrednich i pośrednich mających wpływ na produkcję. Najprostsze podejście dotyczy bezpośrednich nakładów energetycznych i wyjść

zaobserwowanych w danym procesie. W konsekwencji efektywność energetyczna plantacji może być wyrażona przez relację $E_{bio}/E_{zuż}$, bądź $(E_{bio}-E_{zuż})/E_{zuż}$.

Składową E_{bio} , czyli całkowitą ilość energii zawartej we wszystkich formach biopaliw uzyskanych z danej plantacji można wyrazić jako:

$$E_{bio} = A \times M_{plon} \times \gamma \times \sum_{k=1}^n \alpha_k \times W_{bio,k} \quad (11)$$

gdzie:

A – powierzchnia uprawy,

M_{plon} – masa plonu na jednostkę powierzchni uprawy,

γ – ogólna wydajność masowa biopaliwa z uprawy,

α_k – udział masowy k -tego gatunku biopaliwa,

$W_{bio,k}$ – wartość opałowa k -tego gatunku biopaliwa.

Pozyskane różnego rodzaju biopaliwa (biodiesel, biomasa nie oleista np. łądygi) mogą być w inny sposób wykorzystane (wymagają zastosowania innej technologii przetwarzania). Stąd można mówić o ilości energii i wydajności w odniesieniu do różnych biopaliw. W przypadku, gdy biomasa odpadowa (nie oleista) nie jest przetwarzana na paliwo (energię), to jedynym paliwem uzyskanym w procesie jest biodiesel.

Oczywiście, jeśli w danym systemie produkcyjnym powstaje tylko jeden gatunek paliwa, wzór powyższy upraszcza się do postaci:

$$E_{bio} = A \times M_{plon} \times \gamma \times W_{bio} \quad (12)$$

W przypadku biopaliw płynnych całkowita ilość energii zawartej w biopaliwie jest trudna do jednoznacznego oszacowania, gdyż zależy od rodzaju szeregu operacji technologicznych następujących na kolejnych późniejszych etapach przetwórstwa, które będą musiały być uwzględnione w dalszych etapach pracy. Wzór (12) w najprostszym przypadku może być jednoznacznie wykorzystany w sytuacji, gdy biopaliwem jest bezpośrednio biomasa pochodzenia rolnego poddana spalaniu bez dalszego przetwarzania (wówczas $\gamma = 1$).

Na podstawie równań (10) i (12) można sformułować postać zależności $E_{bio}/E_{zuż}$ oraz $(E_{bio}-E_{zuż})/E_{zuż}$. Zależności te przedstawiają równania (13) i (14):

$$\frac{E_{bio}}{E_{zuż}} = \frac{M_{plon} \times \gamma \times \sum_{k=1}^n \alpha_k \times W_{bio,k}}{W_{pal} \times \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i}{d_i}} \quad (13)$$

oraz

$$\frac{E_{bio} - E_{zuż}}{E_{zuż}} = \frac{\left(M_{plon} \times \gamma \times \sum_{k=1}^n \alpha_k \times W_{bio,k} \right) - W_{pal} \times \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i}{d_i}}{W_{pal} \times \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i}{d_i}} \quad (14)$$

W sytuacji, gdy stosunek ω_i / d_i jest taki sam we wszystkich operacjach, lub gdy może być zastąpiony wartością średnią $\langle \omega_i / d_i \rangle$, oraz gdy występuje tylko jedna postać wynikowego biopaliwa równania (13) i (14) przyjmują prostszą postać:

$$\frac{E_{bio}}{E_{zuż}} = \frac{M_{plon} \times \gamma \times W_{bio}}{m \times W_{pal} \times \frac{\omega}{d}} \quad (15)$$

oraz

$$\frac{E_{bio} - E_{zuż}}{E_{zuż}} = \frac{M_{plon} \times \gamma \times W_{bio} - m \times W_{pal} \times \frac{\omega}{d}}{m \times W_{pal} \times \frac{\omega}{d}} \quad (16)$$

Parametr ω/d występujący w powyższych równaniach jest charakterystyką maszyny i może być uważany za miarę energetycznej wydajności. Jest to jedyny w opisywanej sytuacji parametr, który może być niezależnie sterowany (poprzez dobór maszyny).

Stosunek energii pochodzącej z biopaliw do energii włożonej na wyprodukowanie tego biopaliwa może być różny. Możemy włożyć więcej energii na uprawę niż uzyskamy w plonie. Możemy mieć przypadek, że odjemna może być większa od odjemnika. W sytuacji odwrotnej oczywiście zakres ujemnych wartości jest dla praktyki produkcyjnej niekorzystny, gdyż wskazuje, że w tych warunkach zużywana w procesach agrotechnicznych energia byłaby większa od uzyskiwanej w biopaliwie.

Uproszczony model (13) wydajności energetycznej plantacji przeznaczonych do produkcji biomasy na biopaliwa daje tylko zerowe, pierwsze przybliżenie rzeczywistości, które może być stosowane w odniesieniu do małej skali produkcji np. na własny użytek w gospodarstwie, wówczas, gdy energia potrzebna do transportu może być zaniedbana. Prowadzi to do wniosku, że efektywność plantacji nie zależy od powierzchni pola (w całej relacji $E_{bio}/E_{zuż}$ powierzchnia A ulega skróceniu), ale od szeregu parametrów opisujących proces (takich jak wydajność upraw, M_{pal} , właściwości stosowanego sprzętu oraz od stosunku ω_i / d_i). Można łatwo zauważyć, że wzrost wartości opałowej paliwa wykorzystywanego w działalności rolniczej, W_{pal} , jak również zwiększenie ilości operacji, zużycia paliwa, ω_i , lub spadku, d_i , prowadzą do spadku wydajności energetycznej. Ten wynik może być nieznacznie zmodyfikowany w przypadku, gdy wartość

opałowa W_{pal} wpływa na zużycie paliwa. Taka funkcjonalna zależność $\omega_i (W_{pal})$ muszą musi być ustalona doświadczalnie.

5.2. Model uprawy na większą skalę

Przeprowadzone powyżej rozważania dotyczyły sytuacji, w której cała plantacja jest zlokalizowana na jednym, ciągłym polu. Sytuacji takiej trudno spodziewać się w przypadku większych plantacji współpracujących z dużymi producentami biopaliw. Analiza elementów składowych strumienia energetycznego, zastosowanych surowców, środków technicznych pozwoliła na udokładnienie modelu. W takim przypadku model musi zawierać dodatkowe człony równań opisujące wkłady energii dla różnych technologii uprawy, jak również energię zużytą na transport między polami i poza ich granicami, która wpływa na zmniejszenie energetycznej wydajności plantacji.

Wydajność energetyczna plantacji może być przedstawiona jako stosunek całkowitej energii wytwarzanej do sumy nakładów energetycznych. Po stronie wyjścia może być wyrażony przez wartość opałow, wydajność plonów i ułamki masowe składników roślin stosowanych w produkcji biopaliw. Zużycie paliwa i wartości opałow paliw stosowanych w następnych kolejnych operacjach agrotechnicznych stanowią główny element zużycia energii w systemie produkcyjnym. Należy do tego doliczyć energię zużywaną na transport, która zależy od odległości transportu, zużycia paliwa i jego wartości opałowej. Kolejny wkład stanowi energia wbudowana zawarta w środkach produkcji. Energia wbudowana (ilość energii, wykorzystywana do produkcji dobra – odpowiadająca pojęciu emergii²⁰⁹ zawarta w środkach technicznych (takich jak, np. maszyny, urządzenia, nawozy, środki owadobójcze) zależy od rodzaju użytych maszyn i innych środków produkcji, a jej udział, E_{emb} , od stopnia wykorzystania tych środków produkcji w procesach produkcyjnych. W konsekwencji efektywność energetyczna może być wyrażona jako:

$$\mathcal{E} = \frac{E_{bio}}{E_{zuż} + E_{tr} + E_{emb}} \quad (17)$$

E_{bio} – energia uzyskana z pola,

$E_{zuż}$ – energia wydatkowana na uprawę,

E_{tr} – energia zużywana do transportu poza polami,

E_{emb} – ułamek energii zawartej w środkach produkcji zużywany w danej operacji i transporcie.²¹⁰

²⁰⁹ H.T. Odum, *Environment, power, and society for the twenty-first century. The hierarchy of energy*, New York, Columbia University Press, 2007.

²¹⁰ O. A. Orynycz, A. Wasiak, *Effects of tillage technology on energetic efficiency of rapeseed plantation for biofuel production*, [W:] Applied Computer Science, Lublin University of Technology, vol.10, no. 2, 2014, p. 67–76.

Wartość $\varepsilon = 1$ odpowiada przypadkowi, w którym suma wkładów energii zużywanej w procesach technologicznych jest równa energii wytworzonej, wartości $\varepsilon < 1$ są związane ze stratą energii. Jedyne przypadki, gdy $\varepsilon > 1$ są praktycznie użyteczne dając więcej energii w postaci biopaliwa, niż energia zużyta w produkcji. Dostępna energia E_{gain} może być, więc zdefiniowana jako nadmiar wytworzonej energii w odniesieniu do sumy wkładów zużytych w produkcji biopaliwa.

$$E_{gain} = E_{bio} - (E_{zuż} + E_{tr} + E_{emb}) \quad (18)$$

lub

$$E_{gain} = (\varepsilon - 1) \times (E_{zuż} + E_{tr} + E_{emb}) \quad (19)$$

Wkłady energii mogą być wyrażone w następujący sposób:

Energia uzyskana z plantacji wynosi:

$$E_{bio} = A \times M_{plon}(c_f, c_w, c_{cp}, \dots) \times \gamma \times \sum_{k=1}^n \alpha_k \times W_{bio,k} \quad (20)$$

gdzie:

A – obszar plantacji (powierzchnia uprawy),

$M_{plon}(c_f, c_w, c_{cp}, \dots)$ – masa plonu na jednostkę powierzchni uprawy. Plon zależy od stężeń: c_f – nawozów, c_w – wody, c_{cp} – środków ochrony roślin stosowanych podczas uprawy. Zależność ta powinna być określona na podstawie empirycznych badań terenowych.

γ – ogólna wydajność masowa biopaliwa z uprawy,

α_k – udział masowy k -tego gatunku biopaliwa,

$W_{bio,k}$ – wartość opałowa k -tego gatunku biopaliwa.

Te same czynniki, wpływające na plony, np. nawozy, nawadnianie, a także rodzaj użytego sprzętu, dają również wkład do wydatkowanej energii. Wkład tych czynników może być uwzględniony poprzez wykorzystanie wartości energii wbudowanej w maszyny i inne środki tj. nawozy, środki ochrony roślin. Energia wbudowana jest to ilość energii zużytej do wyprodukowania danego dobra – pojęcie to zostało później uogólnione i nazwane emergią.²¹¹

²¹¹ H.T. Odum, *Environment, power, and society for the twenty-first century. The hierarchy of energy*, New York, Columbia University Press, 2007.

Ponieważ taki wkład jest tylko częścią energii wbudowanej zużywanej w danej operacji, to zużycie energii na polu podczas operacji agrotechnicznych można zapisać:

$$E_{zuż,agr} = W_{pal} A \times \sum_{i=1}^m \left[\frac{\omega_i}{d_i} \right] + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^K \gamma_{ik} \times Em_k \quad (21)$$

gdzie:

ω_i – zużycie paliwa na jednostkę odległości przebytej w kolejnych procesach agrotechnicznych,

d_i – szerokość pasa terenu obrabianego w jednym ciągu i -tej operacji,

W_{pal} – wartość opałowa paliwa używanego w operacjach agrotechnicznych,

m – liczba operacji agrotechnicznych (w każdej z operacji szerokości pola obrobionego, d_i , i zużycie paliwa, ω_i , może być różne).

γ_{ik} – ułamek energii „wbudowanej” – zawartej w k -tym środku technicznym, zużyty w i -tej operacji (maszyny, nawozy, itp.). Na przykład może być wyrażony przez stosunek czasu pracy w danej operacji do całkowitej oczekiwanej żywotności określonego urządzenia.

Ostatni czynnik, który w częstych sytuacjach odgrywa ważną rolę, dotyczy transportu (w tym plonów poza pola uprawne. Jest to szczególnie ważne w przypadku dużych pól, które są rozmieszczone w różnych oddzielonych od siebie obszarach, niekiedy znajdujących się w dużych odległościach. Udział transportu jest również istotny, gdy plony mają być transportowane na duże odległości do obiektów przetwórczych. Energia transportu także wymaga uwzględnienia wkładów w postaci zużytego paliwa i energii skumulowanej zawartej w środkach transportu. Zatem można ją zapisać w następującej postaci:

$$E_{tr} = \sum_{p=1}^P L_p \times \{ \beta_p \times W_{pal,tr} + Em_{tr,p} \} \quad (22)$$

gdzie:

L_p – odległość przejechana poza polem w p -tym kursie (długość kursu),

β_p – jednostkowe zużycie paliwa w czasie kursu p ,

$W_{pal,tr}$ – wartość opałowa paliwa wykorzystywanego w transporcie,

$Em_{tr,p}$ – ułamek energii zawartej w danym środku transportu zużywany w jednostce pokonywanej odległości

W związku z tym całkowitą ilość energii zużytej w procesach towarzyszących produkcji można przedstawić następującym równaniem:

$$E_{zuż,tot} = E_{zuż,agr} + E_{tr} \quad (23)$$

a wydajność energetyczną wyrazić wzorem:

$$\frac{E_{bio}}{E_{zuż,tot}} = \frac{A \times M_{plon}(c_f, c_w, c_{cp}, \dots) \times \gamma \times \sum_{k=1}^n \alpha_k \times W_{bio,k}}{E_{zuż,tot}} \quad (24)$$

Zauważono, że energia zawarta w środkach produkcji zależy od technologii ich produkcji, a więc jest różna w zależności od modelu, rodzaju, typu maszyny oraz innych środków użytych do uprawy. E_{emb} oznacza udział energii wbudowanej, która zostaje zużyta podczas pracy na jednostce powierzchni, bądź jednostce odległości przebytej przez środek transportu. Wyrażenie opisujące wkład energii wbudowanej w środki produkcji, zawarte we wzorze (21), wpływa na zmniejszenie wydajności energetycznej. Można przypuszczać, szczególnie ze względu na trwałość maszyn, że zmniejszenie to jest stosunkowo niewielkie i prawdopodobnie może być skompensowane poprzez zwiększenie wydajności plantacji uzyskiwane dzięki stosowaniu zabiegów agrotechnicznych (tych, dla których dyskutuje się wkład zużytej energii wbudowanej). Dokładne, szczegółowe uwzględnienie tych relacji wymaga badań wykraczających poza ramy niniejszej pracy.

W wyniku uwzględnienia transportu wzór (24) w przeciwieństwie do wzoru (13) wskazuje, że wydajność plantacji zależy od jej wielkości, która, z kolei, jest warunkowana przez zapotrzebowanie wynikające z wydajności subsystemu przemysłowego. Charakterystyka topologii plantacji powiązana jest z dostępnością gruntów i określa długość dróg stanowiących powiązania pomiędzy polami i decydujących o zużyciu energii na transport pomiędzy polami. Z analizy równań wynika, że transport ten powoduje obniżenie efektywności energetycznej, które musi zależeć od ścieżek topologicznych łączących elementy plantacji.

Dokładna analiza takiego problemu wymaga wiedzy o charakterystykach topologicznych pól konkretnej plantacji, a nie może być rozstrzygnięta w oparciu o ogólne rozważania.

Należy podkreślić, że wzór (24) odpowiada współczynnikowi EROEI stosowanemu w wielu publikacjach.

Innym czynnikiem, nie wyrażonym jawnie w powyższych wzorach, a możliwym do uwzględnienia w obliczeniach numerycznych, jest zależność zużycia paliwa od wartości opałowej paliwa. Konkretnie wartości zużycia paliwa na jednostkę odległości ωi i βp , w ogólnym przypadku mogą być funkcjami wartości opałowej paliwa. Taka zależność może być różna dla każdego typu używanego urządzenia i powinna zostać określona empirycznie. Dlatego trudno ją przedstawić w ogólnej postaci, ale można ją łatwo uwzględnić w obliczeniach wykonywanych numerycznie.

Model opisany powyżej nie zawiera żadnych konkretnych założeń dotyczących gatunków roślin uprawianych, więc jest ogólny i dotyczy każdej plantacji. Tylko stosując konkretne wartości liczbowe odpowiadające charakterystykom

roślin i wydajności plantacji można uzyskać wyniki dotyczące konkretnej praktycznej sytuacji. Skutki wyborów technologicznych dotyczących efektywności energetycznej plantacji zostaną wykazane na podstawie obliczeń numerycznych opartych na realistycznych zestawach danych, co jest przedmiotem dalszych badań.

5.3. Wpływ aspektów technicznych na wydajność energetyczną

5.3.1. Wpływ technologii uprawy na wydajność energetyczną plantacji rzepaku z przeznaczeniem na biopaliwa

Jak wspomniano wcześniej, istnieje kilka technologii uprawy rzepaku z przeznaczeniem na biopaliwa. Poniżej zaprezentowano kilka metod uprawy: klasyczna (płużna), uproszczona, bezpośredni siew. Najczęściej stosowana jest uprawa płużna obejmująca orkę i doprawienie gleby, a także uproszczona polegająca na zastąpieniu pługa zestawem uprawowo-siewnym.²¹²

Tradycyjna metoda uprawy obejmuje dwie fazy uprawowe: późniwną i przedsiwną. Pełna uprawa polega na wczesnym schodzeniu przedplonów z pola np.: mieszanki zbożowo-strączkowe zbierane na zieloną masę, groch, lucerna, jare mieszanki, wczesne ziemniaki. Po zbiorze przedplonów jest czas na wykonanie zabiegów przesiewnych.²¹³ Według Z. Jasińskiej i A. Kolečkiego rzepak uprawiany na stanowiskach po zbożach nie znosi dużych uproszczeń w uprawie (tab. 80). Po przedplonach należy zachować zasady uprawy płużnej polegającej na wykonaniu pełnych uprawek późniwnych, wczesnej orce wpływającej na osiadanie roli oraz starannej uprawie przedsiwnej. Duże znaczenie upatruje się w uprawkach późniwnych, wykonanych nawet kosztem opóźnionej orki siewnej. Uprawki późniwne są zasadne tylko wtedy, gdy do czasu wykonania orki siewnej upłyną co najmniej 2–3 tygodnie.²¹⁴ Niestety w rejonach uprawy rzepaku przedplonów jest stosunkowo niewiele. Niektóre pola trudno zaorać, gdyż warstwa orna jest zbyt przesuszona w wyniku operacji słonecznej oraz pobrania dużej ilości wody przez głęboko sięgające systemy korzeniowe roślin motylkowatych i traw. Dlatego często po tych przedplonach, zamiast podorywki stosuje się zwalczanie chwastów rozłogowych. Późny zbiór przedplonu (gdy okres od zbioru do zasiewu rzepaku jest krótszy niż 4 tygodnie) wymusza zastosowanie uproszczeń polegających na zaniechaniu uprawy późniwnej. Po uprawie płużnej gleba narażona jest na wymieszanie i niszczenie struktury gruzelkowej, co naraża na wystąpienia erozji wietrznej i wodnej. Nacisk kół ciągnika i lemieszki prowadzi do tworzenia się podeszwy płużnej. Gleba po orce siewnej, przed wysiewem rzepaku, jest natychmiast wałowana (aby ograniczyć utratę

²¹² M. Sikora, *Przed wszystkim agrotechnika*, [W:] *Wieś*, nr 2, 2014, s. 2122.

²¹³ T. Juliszewski, T. Zając, *Biopaliwa rzepakowe*, Poznań, PWRiL, 2007, s. 49–51.

²¹⁴ Z. Jasińska, A. Kolečki, *Szczegółowa uprawa roślin 2*, Wrocław, Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 1999, s. 412–434.

wody i uzyskać korzystną strukturę gleby) w celu zapewnienia dobrych wschodów wysianego rzepaku. Stosowanie takich zabiegów uprawowych często przesusza wierzchnią warstwę gleby, co przy suchych latach postrzegane jest jako duża niedogodność i czynnik ograniczający plonowanie nasion.²¹⁵

W nowoczesnej uprawie widoczne jest przechodzenie z systemu klasycznego do uproszczonego. Ta uproszczona metoda uprawy, początkowo niższej wydajności, ma dać w przybliżeniu taką samą wydajność, jak uzyskiwana w tradycyjnej metodzie. Przed zastosowaniem uproszczonej uprawy należałoby stworzyć odpowiednie warunki, zniszczyć uciążliwe chwasty, zatroszczyć się o właściwe pH i zasobność gleby w fosfor, potas i magnez. Takie przechodzenie do UTU może odbywać dwojako poprzez:

- zastąpienie orki zabiegami przygotowującymi glebę o zróżnicowanej głębokości roboczej i intensywności,
- siew bezpośredni w mulcz lub ściern.²¹⁶

Na przykład w przedsiębiorstwie rolnym „Barycz” wykorzystywane są oszczędne zestawy firmy Duro France: agregat uprawowy *Compil* (pracujący na głębokości 3–12 cm wyposażony w wały zagęszczające) oraz zestaw *Strip-Till* (głębosz + wał strip-till spulchniający glebę w rzędzie siewu oraz umożliwiający bezpośredni siew bez uprawy ziemi) – tab. 78 i tab. 79.

Tab. 78. Dane techniczne agregatu uprawowego *Compil*

Szerokość pracy [m]	4,0	5,0	6,3	7,1
Waga [kg]	5 500	6 500	7 500	8 500
Liczba elementów roboczych	8	12	14	20
Wymagana moc [KM]	100–130	110–150	150–200	170–220

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych firmy „Agri-Consult”

Tab. 79. Dane techniczne zestawu *Strip-Till*

Parametry	rama stała		rama rozciągana	
Ilość rzędów	4	6	6	8
Szerokość robocza [m]	3	3/3,6/4,5	3/3,6/4,5	4
Wymagana moc [KM]	120	140	140	150
Waga [kg]	1200	1500	1500	1700

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych firmy „Agri-Consult”

²¹⁵ T. Juliszewski, T. Zając, tenże..., s. 49–51, W. Zieleniewicz, *Uproszczenia w uprawie*, [W:] Farmer, nr 16, 2008, s. 1–4.

²¹⁶ W. Zieleniewicz, *Uproszczenia w uprawie*, [W:] Farmer, nr 16, 2008, s. 1–4.

W ww. przedsiębiorstwie przez cały cykl produkcji zbóż i rzepaku zużywa się ok. 45 l/ha paliwa. Do pracy z 7-metrowym *Compilem* wystarczy ciągnik John Deere 8220 o mocy 220 KM, który przy prędkości pracy 12 km/h wykazuje się wydajnością 6–7 ha/h zużywając przy tym ok. 5–6 l/ha (wysoka żywotność łopatek, które wystarczają na 4000 ha).²¹⁷

Taki system uprawy jest uzasadniony przy opóźnionych zniwach przedplonów, dużych arealach zasiewów rzepaku lub w warunkach zapotrzebowania na zmniejszanie nakładów energii. Zaniechanie orki zmniejsza ryzyko wystąpienia erozji wietrznej i wodnej. Zwiększa się natomiast zawartość próchnicy do 20 cm głębokości. Zmniejszone parowanie poprawia stosunki wodne. System bezorkowy stymuluje rozwój dżdżownic (ok. 90 szt./m³), które nie stają się ofiarami ptaków w trakcie orki. Przyrost populacji dżdżownic przyspiesza rozkład materii organicznej i zwiększa kanały powietrzne w glebie, co ma bezpośredni wpływ na rozwój mikroflory glebowej. W porównaniu z klasyczną uprawą znacznie wolniej kształtuje się proces wymywania składników pokarmowych w głąb gleby. Takie uproszczenia pozwalają na wcześniejszy wysiew nasion. Pierwsze lata stosowania takiego systemu powodują obniżkę plonów, lecz po pewnym czasie poprawne stosowanie uproszczeń w dobrych warunkach glebowych pozwala na uzyskanie zbliżonych plonów w porównaniu do uprawy tradycyjnej.²¹⁸

W każdej z tych ww. technologii istotną sprawą jest możliwość zaspokojenia zapotrzebowania w rolnictwie na olej napędowy biodiesla. Przeciętnie rolnik w Polsce na uprawę 1 ha zużywa 120 l oleju napędowego/rok. Na przykład gospodarstwo o powierzchni 20 ha potrzebuje ok. 7,7 tony rzepaku/rok, aby być samowystarczalnym w zakresie potrzeb zaopatrzenia w biopaliwo.²¹⁹ W zależności od rodzaju technologii koszty związane z uprawą mogą stanowić 40–75% ogólnych wydatków, na które bezpośredni wpływ ma na ilość zużywanego oleju napędowego.²²⁰

Dostępne dane wskazują na praktyczne wykorzystanie wielu metod, jak również na istnienie kilku wariantów poszczególnych technologii wykazujących różne wymagania w odniesieniu do wkładu energii. Stąd też w pracy podjęto próbę porównania 3 systemów uprawy rzepaku ozimego dokonując zestawienia zabiegów agrotechnicznych z uwzględnieniem czasu pracy oraz zużycia oleju napędowego przy zabiegach agrotechnicznych (tab. 80 i tab. 81).

²¹⁷ Dane z przedsiębiorstwa rolnego „Barycz”.

²¹⁸ W. Zieleniewicz, *Uproszczenia w uprawie*, [W:] Farmer, nr 16, 2008, s. 1–4.

²¹⁹ M. Jasiulewicz, *Potencjał biomasy w Polsce*, Koszalin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2010, s. 81.

²²⁰ W. Zieleniewicz, tamże..., s. 1–4.

Tab. 80. Zestawienie zabiegów agrotechnicznych przy uprawie rzepaku ozimego różnymi technologiami

Metoda tradycyjna	Metoda uproszczona	Siew bezpośredni
• Przedplon (przygotowanie stanowiska) • Talerzowanie (przy stanowisku zadarnionym) • Podorywka • Bronowanie • Orka siewna (18–22 cm) • Wałowanie • Siew • Ochrona i nawożenie	• Przedplon (pozostawienie resztek poźniwnych – mulczowanie) • Uprawka poźniwna: rototylowanie lub kultywacja na gł. 8–10 cm • Bronowanie pielęgnacyjne • Siew redlicowy • Ochrona i nawożenie	• Przedplon • Brak powierzchniowej uprawy • Siew z redlicami zębowymi lub talerzowymi • Ochrona i nawożenie

Źródło: opracowanie własne na podstawie T. Juliszewski, T. Zając, tamże..., s. 49–51; Z. Jasińska, A. Kołdecki, *Szczegółowa uprawa roślin 2*, Wrocław, Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 1999, s. 412–434; B. Igiliński, R. Buczkowski, M. Cichosz, *Technologie bioenergetyczne*, Toruń, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, 2009, s. 218–223.

Tab. 81. Pracochłonność i zużycie paliwa na uprawę 1 [ha] rzepaku ozimego różnymi technologiami

Metody uprawy	Średni czas pracy [h] ²	Średnie zużycie paliwa [l] ²
I. Tradycyjna ¹ :		
• zabiegi agrotechniczne + zbiór	4,0	24
• orka	1,5	9,0
• ochrona i nawożenie	3,5	21
Suma	9,0	54
Do ww. sumy w zależności od rodzaju przedplonu należy doliczyć:		
II. motylkowe (np. lucerna – zbiór dwufazowy)	10,3	61,8
III. okopowe (np. wczesne ziemniaki – zbiór kombajnem dwurzędowym)	22	132
IV. strączkowe (np. łubin – zbiór zielonej masy lub przeoranie)	7,0	42
V. Tradycyjna ³ :	Średni czas pracy [h] ³	Średnie zużycie paliwa [l] ³
• zabiegi agrotechniczne + zbiór	8,5	51
• orka	2,5	15

Metody uprawy	Średni czas pracy [h] ²	Średnie zużycie paliwa [l] ²
• ochrona i nawożenie	8,0	48
Suma	19	114
Przedplon: mieszanki koniczyn z trawami jako pasza dla bydła	-	-
I. Uproszczona¹:	Średni czas pracy [h]²	Średnie zużycie paliwa [l]²
• zabiegi agrotechniczne + zbiór	3,0	18
• orka	-	-
• ochrona i nawożenie	3,5	21
Suma	6,5	39
Do ww. sumy w zależności od rodzaju przedplonu należy doliczyć:		
II. motylkowe (np. lucerna – zbiór dwufazowy)	10,3	61,8
III. okopowe (np. wczesne ziemniaki – zbiór kombajnem dwurzędowym)	22	132
IV. strączkowe (np. łubin – zbiór zielonej masy lub przeoranie)	7,0	42
V. Uproszczona⁴:	Średni czas pracy [h]⁴	Średnie zużycie paliwa [l]⁴
• zabiegi agrotechniczne + zbiór	x	x
• orka	-	-
• ochrona i nawożenie	x	x
Suma:		
z uwzględnieniem poplonów, międzyplonów i płodozmianu	7,5	45
I. Siew bezpośredni¹:	Średni czas pracy [h]²	Średnie zużycie paliwa [l]²
• zabiegi agrotechniczne + zbiór	2,0	12
• orka	-	-
• ochrona i nawożenie	4,0	24
Suma	6,0	36
Do ww. sumy w zależności od rodzaju przedplonu należy doliczyć:		
II. motylkowe (np. lucerna – zbiór dwufazowy)	10,3	61,8

Metody uprawy	Średni czas pracy [h] ²	Średnie zużycie paliwa [l] ²
III. okopowe (np. wczesne ziemniaki – zbiór kombajnem dwurzędowym)	22	132
IV. strączkowe (np. łubin – zbiór zielonej masy lub przeoranie)	7,0	42

Uwagi:

¹ uwzględniono niezbędne prace w technologii uprawy rzepaku ozimego

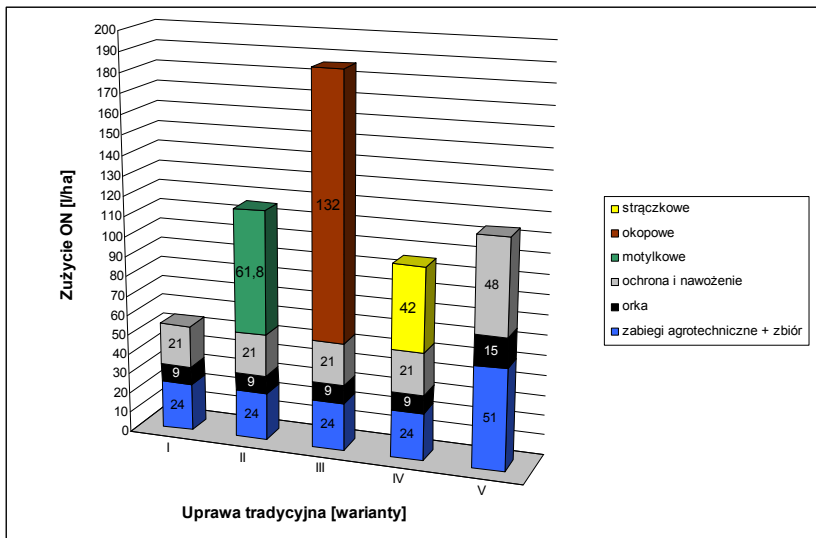
² kalkulacje własne autora z wykorzystaniem danych z wybranych gospodarstw rolnych dobrze zmechanizowanych, w których średnie zużycie paliwa wyniosło 6 l/ha

³ dane z indywidualnego gospodarstwa rolnego (mała skala produkcji na potrzeby własne), w których średnie zużycie paliwa wyniosło 6 l/ha

⁴ T. Perrier, *Informacja prywatna z przedsiębiorstwa rolnego „Barycz”*, 2014, przy uwzględnieniu średniego zużycia paliwa 6 l/ha

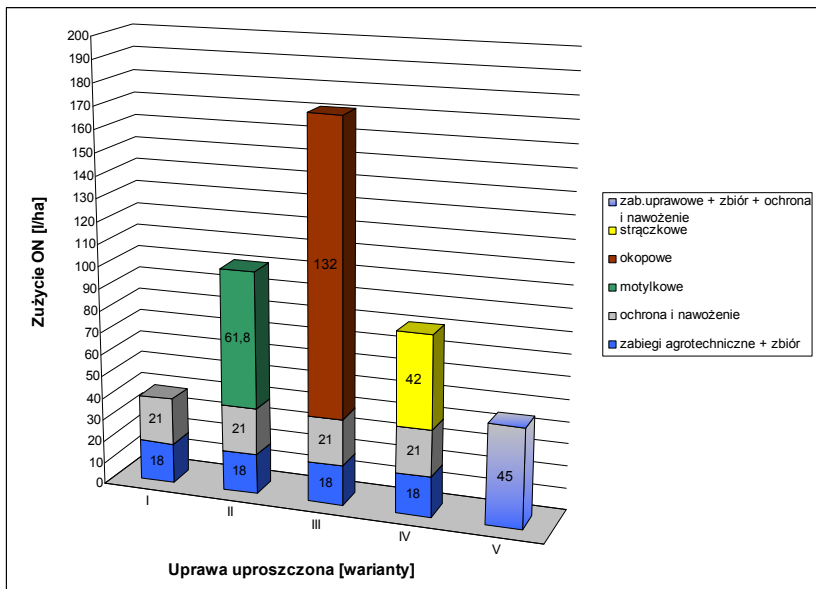
Źródło: opracowanie własne.

Oszacowanie nakładów energii dla tych metod opiera się na zestawieniu wielu czynności zrealizowanych różnymi sposobami, mimo że pewne operacje mogą być pominięte. W każdym z tych przypadków oczywisty jest fakt, że zużycie paliwa jest wprost proporcjonalne do ilości przepracowanych godzin. Należy zauważyć, że główne rozbieżności wynikają z różnego jednostkowego zużycia paliwa w zależności od zastosowanego rodzaju przedplonu. W drugiej strategii orka i inne operacje agro-techniczne są wyraźnie zredukowane. Z kolei metoda siewu bezpośredniego nie zawiera orki, a inne operacje są jeszcze bardziej ograniczone. Porównanie zużycia energii podano na rys. 42, 43, 44 pomiędzy metodami uprawy.



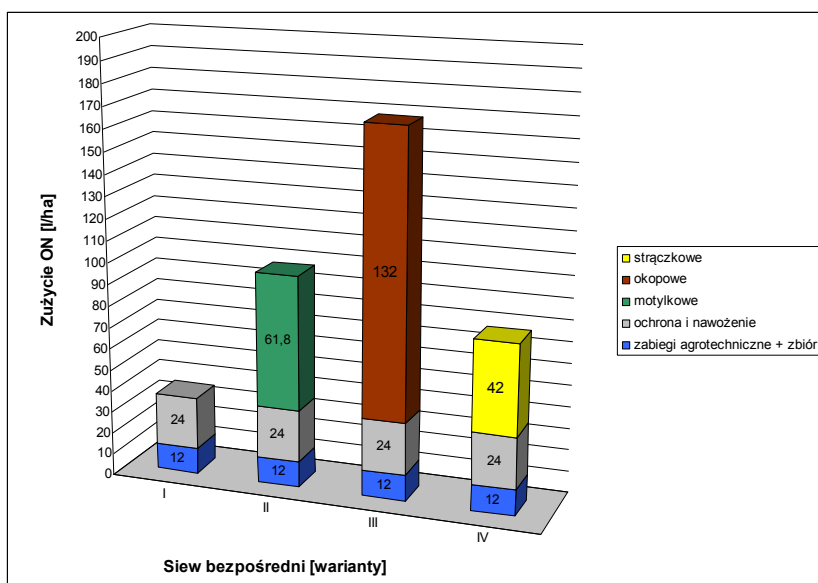
Rys. 42. Zużycie paliwa na hektar w tradycyjnej uprawie plantacji z zastosowaniem różnych przedplonów

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 43. Zużycie paliwa na hektar w uproszczonej uprawie plantacji z zastosowaniem różnych przedplonów

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 44. Zużycie paliwa na hektar metodą siewu bezpośredniego z zastosowaniem różnych przedplonów

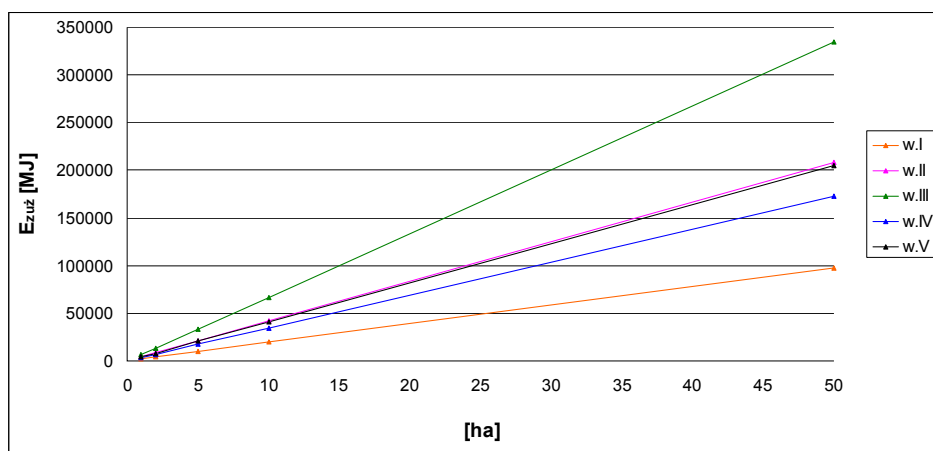
Źródło: opracowanie własne.

Odpowiednie wymagania energetyczne dla różnych wariantów i metod technologicznych (obliczone na podstawie zużycia paliwa i wartości opałowej paliwa) przedstawiono w tab. 82. Te same dane przedstawiono na rys. 45, 46, 47, które pokazują zależność liniową (tj. zużycie energii proporcjonalne do powierzchni pola, przy czym współczynnik proporcjonalności jest zależny od sposobu uprawy).

Tab. 82. Zużycie energii dla różnych wariantów i metod technologicznych stosowanych na plantacjach rzepaku

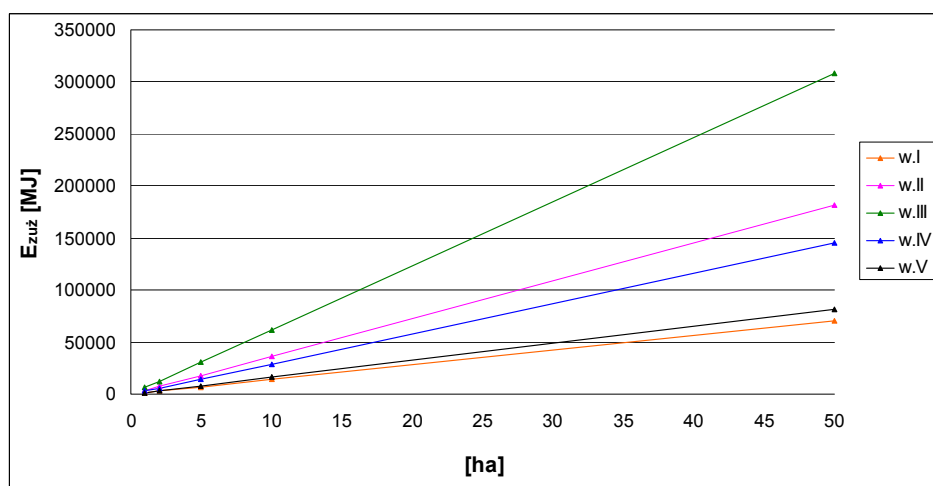
Tradycyjna											
Pola [ha]	Zużr wariant I [l/ha]	Zużr wariant II [l/ha]	Zużr wariant III [l/ha]	Zużr wariant IV [l/ha]	Zużr wariant V [l/ha]	W _{op} ON [MJ/l]	E _{znz} I [MJ]	E _{znz} II [MJ]	E _{znz} III [MJ]	E _{znz} IV [MJ]	E _{znz} V [MJ]
1	54	115,8	186	96	114	36	1944	4169	6696	3456	4104
2	54	115,8	186	96	114	36	3888	8338	13392	6912	8208
5	54	115,8	186	96	114	36	9720	20844	33480	17280	20520
10	54	115,8	186	96	114	36	19440	41688	66960	34560	41040
50	54	115,8	186	96	114	36	97200	208440	334800	172800	205200
UTU											
1	39	100,8	171	81	45	36	1404	3629	6156	2916	1620
2	39	100,8	171	81	45	36	2808	7258	12312	5832	3240
5	39	100,8	171	81	45	36	7020	18144	30780	14580	8100
10	39	100,8	171	81	45	36	14040	36288	61560	29160	16200
50	39	100,8	171	81	45	36	70200	181440	307800	145800	81000
Siewu bezpośredniego											
1	36	97,8	168	78	-	36	1296	3521	6048	2808	-
2	36	97,8	168	78	-	36	2592	7042	12096	5616	-
5	36	97,8	168	78	-	36	6480	17604	30240	14040	-
10	36	97,8	168	78	-	36	12960	35208	60480	28080	-
50	36	97,8	168	78	-	36	64800	176040	302400	140400	-

Źródło: opracowanie własne.



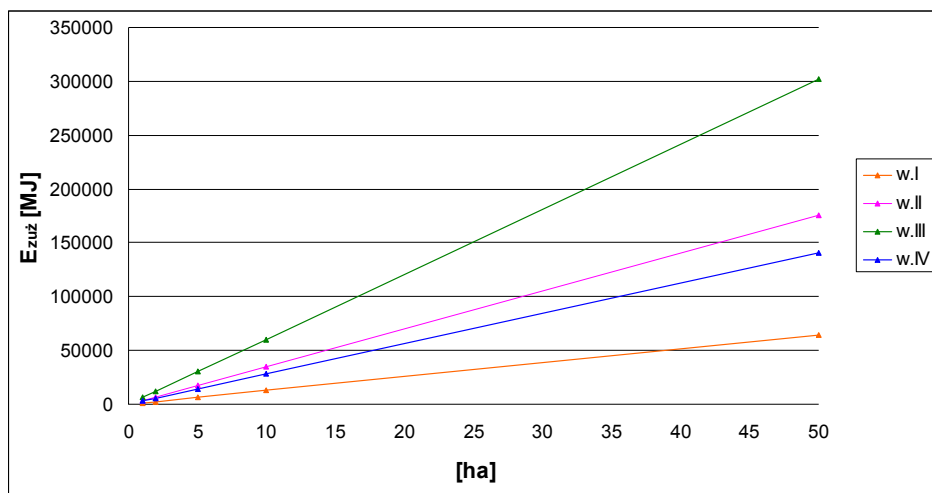
Rys. 45. Zależność zużycia energii od powierzchni pola dla różnych wariantów metodą tradycyjną

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 46. Zależność zużycia energii od powierzchni pola dla różnych wariantów metodą UTU

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 47. Zależność zużycia energii od powierzchni pola dla różnych wariantów metodą siewu bezpośredniego

Źródło: opracowanie własne.

Dane przedstawione w tabeli 82 wskazują bardzo dużą różnorodność zapotrzebowania na energię w poszczególnych wariantach. W tej chwili trudno ustalić ilość energii zawartej w urządzeniach, nie tylko ze względu na pewne trudności oceny, ale również dlatego, że wkład ten należy ocenić dla każdego typu maszyny i każdego innego urządzenia technicznego stosowanych w uprawie. Z drugiej strony można by uznać, że maszyny agrotechniczne są zwykle przewidywane na długotrwałe użycie, a tym samym tylko niewielka część zawartej energii powinna być brana pod uwagę. Biorąc pod uwagę szacunkowe obliczenia dokonane przez P. Börjessona²²¹ energia zawarta silnie zależy od rozwoju rolno-technicznego producentów i stosowanych środków produkcji (maszyn, nawozów, herbicydów lub insektycydów), a tym samym wyraźnie zmienia się z czasem. Na podstawie danych przedstawionych w P. Börjesson *Energy Analysis...*²²² wkład ten może być w przybliżeniu oszacowany na 25 000 MJ/rok w przeliczeniu na 50 ha plantacji.

Odrębnym zadaniem jest określenie ilości energii uzyskanej z plantacji. Zadanie to wymaga pewnych założeń. Zwłaszcza w przypadku rzepaku biomasa nie jest bezpośrednim źródłem energii i wymaga dalszej obróbki w ramach przemysłowej instalacji produkcyjnej. Podsystem przemysłowy zawiera kilka

²²¹ P. I. I. Börjesson, *Energy Analysis Of Biomass Production and Transportation*, [W:] Biomass and Bioenergy, vol. 11, no. 4, 1996, p. 305–318.

²²² P. I. I. Börjesson, tenże..., p. 305–318.

etapów i także wymaga nakładów energii na każdym etapie konwersji. Jako wartość odniesienia (E_{bio}) tj. końcowa ilość energii uzyskanej po przetworzeniu biomasy w podsystemie przemysłowym przyjęta jest średnia wartość uzyskiwana w przemyśle. (Wpływ technologii przetwarzania na tę wartość będzie przedmiotem przyszłych badań). Wydajność plantacji może zależeć od sposobu uprawy, technologii obróbki, użytych nawozów. Dane na ten temat w literaturze są skąpe, rozbieżne i sprzeczne. To założenie wymaga eksperymentalnych badań terenowych. Wydajność ziarna z 1 ha wynosi 3 Mg ziarna (w oparciu o dane z przedsiębiorstw rolnych), co daje 1140 litrów biodiesla, dlatego na przykład z 50 ha plantacji można uzyskać 150 Mg ziarna i 57 000 litrów biodiesla. Biorąc pod uwagę wartość opałową biodiesla równą 34,59 MJ/l uzyskuje się 1 971 630 MJ energii z 50 ha plantacji. W konsekwencji wydajność energetyczną dla różnych rozmiarów plantacji przedstawiono w tab. 83.

Tab. 83. Ilość energii uzyskana z biopaliw przy różnych wielkościach plantacji

Pola [ha]	W_{op} oleju rzepakowego [MJ/l]	Wydajność [l/ha]	Wydajność energetyczna [MJ]
1	34,59	1140	39432,6
2	34,59	1140	78865,2
5	34,59	1140	197163,0
10	34,59	1140	394326,0
50	34,59	1140	1971630,0

Źródło: opracowanie własne.

Wartość stosunku (równanie 17) powyższej ilości energii uzyskanej z pola do energii wydatkowanej podczas operacji agrotechnicznych przedstawiono w tabeli 84. Wartości te, są pierwszym przybliżeniem wydajności energetycznej (lub EROEI) i różnią się od dwóch do ponad dziesięciu jednostek w zależności od wybranych wariantów uprawy.

Należy zauważyć, że wartości przedstawione w tab. 84 są takie same dla tych samych wariantów technologii przy różnych rozmiarach plantacji. Wartości wydajności dla różnych wariantów technologii są bardzo różne. Wyniki obliczeń nie obejmują wkładu energii zużywanej w transporcie poza polem, E_{tr} , a także energii zawartej E_{emb} , zarówno dla środków technicznych stosowanych na polu, jak i na zewnątrz pola. Oczywiście udziały te, dodawane do mianownika w równaniu (17) zmniejszą wartość wydajności. Trudno oszacować ilościowo te udziały w formie ogólnej. Transport poza pola zależy od charakterystyki topologicznej plantacji i od odległości plantacji do zakładu przemysłowego. W przypadku małych plantacji główną rolę powinna odgrywać odległość do obiektu przemysłowego, zaś przy bardzo dużych plantacjach można oczekiwać rozproszenia pól (plantacja składa się z kilku obszarów oddzielonych pewnymi odległościami),

co powoduje konieczność częstego transportu towarów (maszyn, środków itp.) pomiędzy polami.

Porównanie wartości wskazuje, że wytwarzana energia jest większa niż nakłady energii w podsystemie rolnym. Oczywiście oznacza to opłacalność energetyczną, przynajmniej na poziomie nakładów energii wymaganej do przeprowadzenia operacji rolnych.

Tab. 84. Efektywność energetyczna $\mathcal{E}$ dla kilku wariantów i różnych metod produkcji

Tradycyjna					
Pola [ha]	$E_{bio}/E_{zuż}$ I [MJ]	$E_{bio}/E_{zuż}$ II [MJ]	$E_{bio}/E_{zuż}$ III [MJ]	$E_{bio}/E_{zuż}$ IV [MJ]	$E_{bio}/E_{zuż}$ V [MJ]
1	20,28	9,46	5,89	11,41	9,61
2	20,28	9,46	5,89	11,41	9,61
5	20,28	9,46	5,89	11,41	9,61
10	20,28	9,46	5,89	11,41	9,61
50	20,28	9,46	5,89	11,41	9,61
UTU					
1	28,09	10,87	6,41	13,52	24,34
2	28,09	10,87	6,41	13,52	24,34
5	28,09	10,87	6,41	13,52	24,34
10	28,09	10,87	6,41	13,52	24,34
50	28,09	10,87	6,41	13,52	24,34
Siewu bezpośredniego					
1	30,43	11,20	6,52	14,04	-
2	30,43	11,20	6,52	14,04	-
5	30,43	11,20	6,52	14,04	-
10	30,43	11,20	6,52	14,04	-
50	30,43	11,20	6,52	14,04	-

Źródło: opracowanie własne.

W obliczeniach dotychczas zaprezentowanych energia zawarta w urządzeniach i energia transportu nie zostały uwzględnione. Według Orynych i Wasia-
ka²²³ wkład energii wbudowanej E_{emb} zmniejsza wydajność do pewnego stopnia, ale nie zmniejsza jej poniżej wartości $\varepsilon = 1$. W oparciu o orientacyjne warto-

²²³ O. A. Orynych, A. Wasiak, *Effects of tillage technology on energetic efficiency of rapeseed plantation for biofuel production*, [W:] Applied Computer Science, vol. 10, no. 2, 2014, p. 67–76.

ści²²⁴ można skorygować wyniki przedstawione w tabeli 84. Tak poprawione wartości są przedstawione w tabeli 85, jak zakładano są one mniejsze niż w tabeli 84. Jest to obniżenie rzędu około 10% do 25%.

Tab. 85. Stosunek energii uzyskanej z plantacji do energii zużytej w operacjach agrotechnicznych z uwzględnieniem udziału energii wbudowanej, E_{emb} , zużywanej przy wykorzystaniu środków produkcji dla trzech metod uprawy

Tradycyjna					
Pola [ha]	$E_{bio}/E_{zuż,agr}$ I [MJ]	$E_{bio}/E_{zuż,agr}$ II [MJ]	$E_{bio}/E_{zuż,agr}$ III [MJ]	$E_{bio}/E_{zuż,agr}$ IV [MJ]	$E_{bio}/E_{zuż,agr}$ V [MJ]
1	16,13	8,45	5,48	9,97	8,56
2	16,13	8,45	5,48	9,97	8,56
5	16,13	8,45	5,48	9,97	8,56
10	16,13	8,45	5,48	9,97	8,56
50	16,13	8,45	5,48	9,97	8,56
UTU					
1	20,71	9,55	5,92	11,54	18,60
2	20,71	9,55	5,92	11,54	18,60
5	20,71	9,55	5,92	11,54	18,60
10	20,71	9,55	5,92	11,54	18,60
50	20,71	9,55	5,92	11,54	18,60
Siewu bezpośredniego					
1	21,96	9,81	6,02	11,92	-
2	21,96	9,81	6,02	11,92	-
5	21,96	9,81	6,02	11,92	-
10	21,96	9,81	6,02	11,92	-
50	21,96	9,81	6,02	11,92	-

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie równania [17] i danych przedstawionych w tabelach 82 i 83 możliwe jest obliczenie maksimum energii, która może być przeznaczona do transportu towarów między polami. Oczywiście taka ilość energii nie może być używana w rzeczywistości, ponieważ nie będzie możliwości dalszego wykorzystania wyprodukowanej energii. Dane uzyskane z zestawienia różnych wariantów technologii produkcji przedstawiono w tabeli 86.

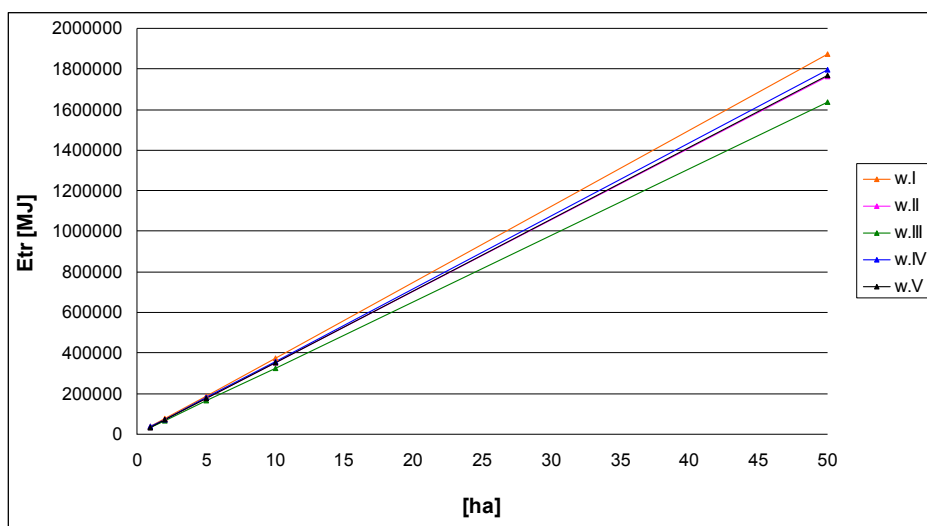
²²⁴ P. I. I. Börjesson, *Energy Analysis Of Biomass Production and Transportation*, [W:] Biomass and Bioenergy, vol. 11, no. 4, 1996, pp. 305–318.

Tab. 86. Maksymalna ilość energii, która może być użyta do transportu przy różnych wariantach uprawy

Tradycyjna					
Pola [ha]	E _{tr} I [MJ]	E _{tr} II [MJ]	E _{tr} III [MJ]	E _{tr} IV [MJ]	E _{tr} V [MJ]
1	37489	35264	32737	35977	35329
2	74977	70528	65473	71953	70657
5	187443	176319	163683	179883	176643
10	374886	352638	327366	359766	353286
50	1874430	1763190	1636830	1798830	1766430
UTU					
1	38029	35804	33277	36517	37813
2	76057	71608	66553	73033	75625
5	190143	179019	166383	182583	189063
10	380286	358038	332766	365166	378126
50	1901430	1790190	1663830	1825830	1890630
Siewu bezpośredniego					
1	38137	35912	33385	36625	-
2	76273	71824	66769	73249	-
5	190683	179559	166923	183123	-
10	381366	359118	333846	366246	-
50	1906830	1795590	1669230	1831230	-

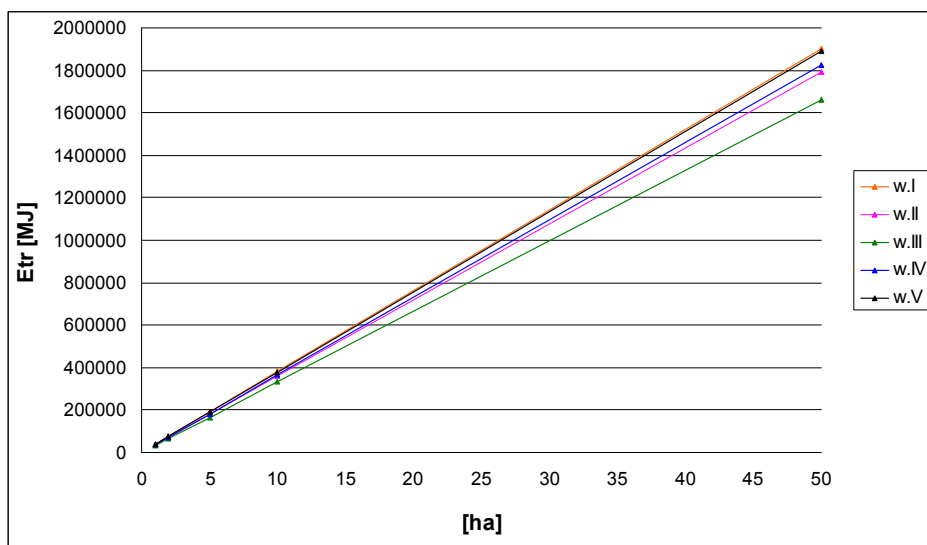
Źródło: obliczenia własne na podstawie danych z: T. Juliszewski, T. Zając, tamże..., s. 49–51; Z. Jasińska, A. Kolečki, *Szczegółowa uprawa roślin 2*, Wrocław, Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 1999, s. 412–434; B. Igiliński, R. Buczkowski, M. Cichosz, *Technologie; Indywidualne gospodarstwo rolne (mała skala produkcji na potrzeby własne) – informacja prywatna*; T. Perrier, *Informacja prywatna z przedsiębiorstwa rolnego „Barycz”*, 2014.

Wartości ww. tabeli odpowiadają całkowitej ilości energii dostępnej z pola po odjęciu energii wydatkowanej na działalność rolniczą, co przedstawiono na poniższych wykresach 48, 49, 50. W praktyce można to podzielić na część użytą w eksploatacji i część przeznaczoną na transport.



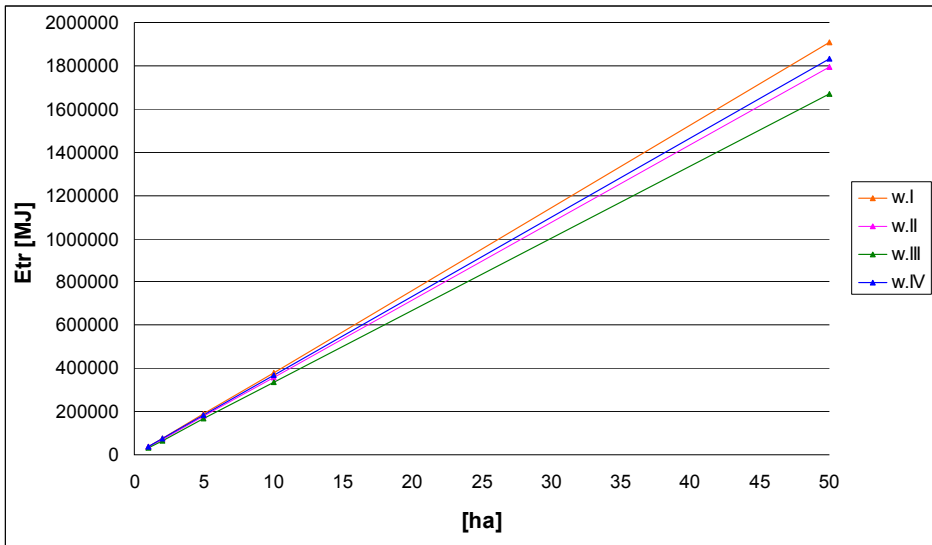
Rys. 48. Maksymalna ilość energii, E_{tr} , przy różnych wariantach uprawy, metodą tradycyjną

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 49. Maksymalna ilość energii, E_{tr} , przy różnych wariantach uprawy, metodą UTU

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 50. Maksymalna ilość energii, E_{tr} , przy różnych wariantach uprawy, metodą siewu bezpośredniego

Źródło: opracowanie własne.

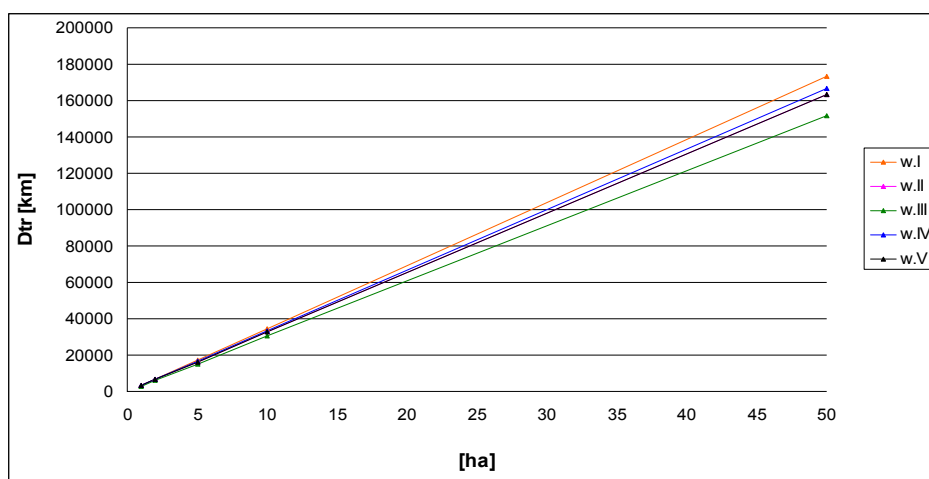
Przyjęcie założenia wprowadzonego w tab. 87 dotyczącego całkowitego zużycia energii na czynnik transportu, pozwoli oszacować maksymalną odległość, którą można ewentualnie przebyć za pomocą tej energii. Takie odległości dla wariantów produkcji rolnej przedstawione są w tab. 87 i na rys. 51, 52, 53.

Tab. 87. Odległość jaka może być przebyta poza polem w stosunku do całkowitego zużycia energii w operacjach agrotechnicznych

Tradycyjna					
Pola [ha]	D _{tr} I [km]	D _{tr} II [km]	D _{tr} III [km]	D _{tr} IV [km]	D _{tr} V [km]
1	3471	3265	3031	3331	3271
2	6942	6530	6062	6662	6542
5	17356	16326	15156	16656	16356
10	34712	32652	30312	33312	32712
50	173558	163258	151558	166558	163558

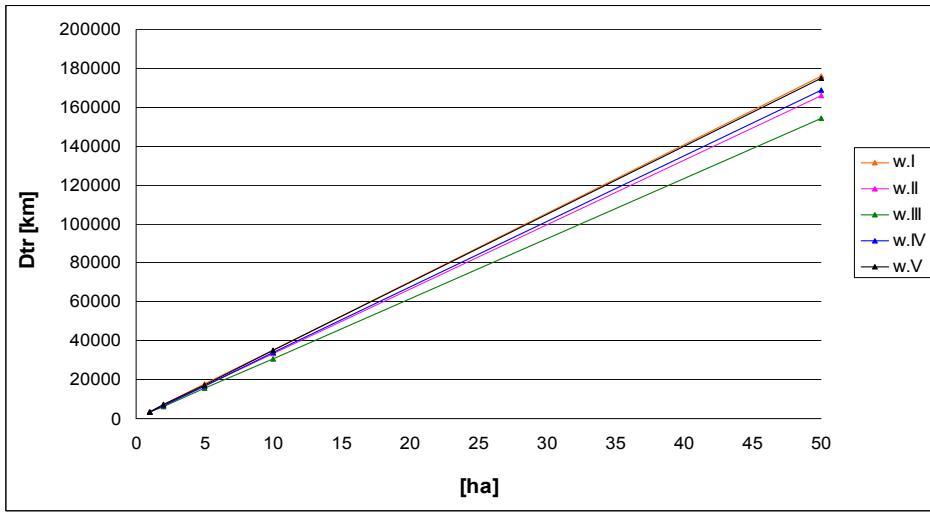
Tradycyjna					
Pola [ha]	D_{tr} I [km]	D_{tr} II [km]	D_{tr} III [km]	D_{tr} IV [km]	D_{tr} V [km]
UTU					
1	3521	3315	3081	3381	3501
2	7042	6630	6162	6762	7002
5	17606	16576	15406	16906	17506
10	35212	33152	30812	33812	35012
50	176058	165758	154058	169058	175058
Siewu bezpośredniego					
1	3531	3325	3091	3391	-
2	7062	6650	6182	6782	-
5	17656	16626	15456	16956	-
10	35312	33252	30912	33912	-
50	176558	166258	154558	169558	-

Źródło: opracowanie własne.



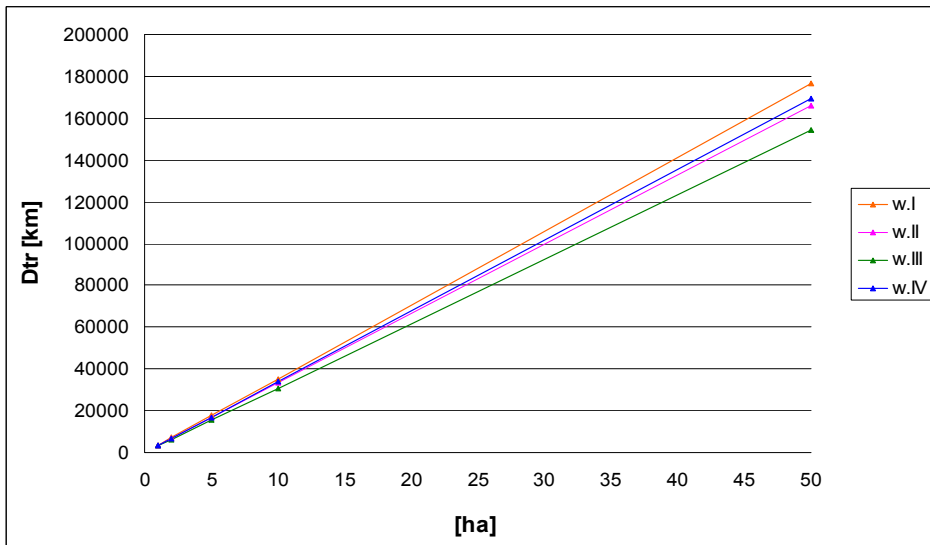
Rys. 51. Odległość poza polem, D_{tr} , w stosunku do całkowitego zużycia energii w operacjach agrotechnicznych przy różnych wariantach uprawy, metodą tradycyjną

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 52. Odległość poza polem, D_{tr} , w stosunku do całkowitego zużycia energii w operacjach agrotechnicznych przy różnych wariantach uprawy, metodą UTU

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 53. Odległość poza polem, D_{tr} , w stosunku do całkowitego zużycia energii w operacjach agrotechnicznych przy różnych wariantach uprawy, metodą siewu bezpośredniego

Źródło: opracowanie własne.

Oczywiście taka maksymalna odległość nie może być stosowana, ponieważ, cała energia „wyprodukowana” na polu, zostanie zużyta podczas operacji rolniczych i transportu. Takie obliczenia mogą dostarczyć producentowi przydatnych informacji dotyczących wyboru technologii rolnej. Najwyraźniej, w każdym przypadku, odległości, które mogą być przebyte w oparciu o wyprodukowane paliwo są proporcjonalne do powierzchni pola. Aby uzyskać realistyczne poczućie prezentowanych odległości należy przeprowadzić dalsze analizy. Zakładając, że ziarna rzepakowe są transportowane do części przemysłowej produkcji, trzeba brać pod uwagę ładowność środków transportowych. Tabela 88 przedstawia liczbę ciężarówek potrzebnych do transportu ziarna rzepaku uprawianego na polach o różnej wielkości.

Tab. 88. Ilość plonu uzyskanego z plantacji i wynikający z niej popyt na środki transportu

Pola [ha]	W_{op} oleju rzepakowego [MJ/l]	Wydajność [l/ha]	Zysk [MJ]	Ilość litrów do transportu	Ilość cystern 3000 [l]	Ilość cystern 10000 [l]	Ilość ziarna [t]	Ilość 3 t truck's	Ilość 12 t truck's
1	34,59	1140	39432,6	1140	0,4	0,1	3	1	0,25
2	34,59	1140	78865,2	2280	0,8	0,2	6	2	0,5
5	34,59	1140	197163,0	5700	1,9	0,6	15	5	1,25
10	34,59	1140	394326,0	11400	3,8	1,1	30	10	2,5
50	34,59	1140	1971630,0	57000	19,0	5,7	150	50	12,5

Źródło: obliczenia własne na podstawie danych z: T. Juliszewski, T. Zając, *Biopaliwa rzepakowe*, Poznań, PWRiL, 2007, s. 49–51; Z. Jasińska, A. KołECKI, *Szczegółowa uprawa roślin 2*, Wrocław, Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 1999, s. 412–434; B. Igiliński, R. Buczkowski, M. Cichosz, *Technologie bioenergetyczne*, Toruń, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, 2009, s. 218–223; Indywidualne gospodarstwo rolne (mała skala produkcji na potrzeby własne) – informacja prywatna; T. Perrier, *Informacja prywatna z przedsiębiorstwa rolnego „Barycz”*, 2014.

Energię zużywaną na transport poza pola można łatwo obliczyć dla konkretnych przypadków, gdy odległości poza polami są wyraźnie określone. Jest to jednak trudne, jeśli nie niemożliwe, aby sformułować ogólną zasadę opisującą relacje między obszarami pól i odległościami dzielącymi te pola. W celu przezwyciężenia tego problemu i przedstawienia niektórych, ewentualnie ogólnych rozwiązań, proponuje się, aby przyjąć, że energia użyta do transportu nie powin-

na przekroczyć pewnej części energii uzyskanej (pozostającej całkowitą energią pobraną do operacji agrotechnicznych). Zakładając, że ta frakcja wynosi 10% uzyskuje się całkowitą odległość jaką można przebyć na zewnątrz pola. Na podstawie wartości zawartych w tab. 89 dokonano zestawienia takich danych w tab. 90.

Tab. 89. Zestawienie ilości uzyskanej energii z biopaliw i energii zużytej dla różnych wariantów i metod technologicznych

	Pola [ha]	E _{bio} [MJ]	E _{zuż I} [MJ]	E _{zuż II} [MJ]	E _{zuż III} [MJ]	E _{zuż IV} [MJ]	E _{zuż V} [MJ]
Tradycyjna	1	39433	1944	4169	6696	3456	4104
UTU	1	39433	1404	3629	6156	2916	1620
Siewu bezp.	1	39433	1296	3521	6048	2808	-
Tradycyjna	2	78865	3888	8338	13392	6912	8208
UTU	2	78865	2808	7258	12312	5832	3240
Siewu bezp.	2	78865	2592	7042	12096	5616	-
Tradycyjna	5	197163	9720	20844	33480	17280	20520
UTU	5	197163	7020	18144	30780	14580	8100
Siewu bezp.	5	197163	6480	17604	30240	14040	-
Tradycyjna	10	394326	19440	41688	66960	34560	41040
UTU	10	394326	14040	36288	61560	29160	16200
Siewu bezp.	10	394326	12960	35208	60480	28080	-
Tradycyjna	50	1971630	97200	208440	334800	172800	205200
UTU	50	1971630	70200	181440	307800	145800	81000
Siewu bezp.	50	1971630	64800	176040	302400	140400	-

Źródło: opracowanie własne.

Pozornie przedstawione wartości wydają się być dość wysokie. Jednakże należy wziąć pod uwagę, że ilości ziaren, które muszą być transportowane są duże. Dla lepszego oszacowania rzeczywistego znaczenia można posłużyć się poniższym przykładem. Ograniczając zainteresowanie tylko do ziaren rzepaku, otrzymuje się wydajność około 3 Mg/ha, co oznacza, że z plantacji 50 ha całkowita ilość ziaren wynosi 150 Mg. Ta ilość może być transportowana przez co najmniej 50 samochodów o pojemności 3 Mg. W związku z tym, odległość podana w tabeli 90, jest całkowitą odległością dostępną dla wszystkich 50 pojazdów lub kilku kursów wykonanych przez mniejszą liczbę pojazdów. Dla przykładu: gęstość nasypowa ziarna rzepaku wynosi ok. 650 kg/m³ (<http://www.zbiorniki-silosy.pl> 2015).

Tab. 90. Całkowita odległość, która może być przejechana poza polem przy założeniu, że energia zużywana w transporcie wynosi 10% zysku energetycznego

	Pola [ha]	D _{tr0,1} I [km]	D _{tr0,1} II [km]	D _{tr0,1} III [km]	D _{tr0,1} IV [km]	D _{tr0,1} V [km]
Tradycyjna	1	342	322	298	328	322
UTU	1	347	327	303	333	345
Siewu bezp.	1	348	328	304	334	-
Tradycyjna	2	685	644	597	657	645
UTU	2	695	654	607	667	691
Siewu bezp.	2	697	656	609	669	-
Tradycyjna	5	1712	1609	1492	1642	1612
UTU	5	1737	1634	1517	1667	1727
Siewu bezp.	5	1742	1639	1522	1672	-
Tradycyjna	10	3425	3219	2985	3285	3225
UTU	10	3475	3269	3035	3335	3455
Siewu bezp.	10	3485	3279	3045	3345	-
Tradycyjna	50	17124	16094	14924	16424	16124
UTU	50	17374	16344	15174	16674	17274
Siewu bezp.	50	17424	16394	15224	16724	-

Źródło: opracowanie własne.

W związku z tym plony na poziomie 3 Mg z hektara zajmą 4,62 m³ objętości skrzyni ładunkowej. Dlatego przyczepa z nadstawką do przewozu zbóż o ładowności 6000 kg i objętości 9,0 m³ pozwoli na jednorazowy transport 6 Mg ziarna. (<http://www.mark-rol.pl/przyczepy.htm> – 2015). Zatem maksymalna odległość, która może oddzielać pola i instalacje przemysłowe w odniesieniu do każdego z wariantów uprawy przedstawiono w tabeli 91.

Tab. 91. Całkowita odległość, która może oddzielać pola i obiekty przemysłowe przy założeniu, że energia zużywana w transporcie wynosi 10% zysku energetycznego (powyżej wkładu energii zużytej na operacje agrotechniczne)

	Pola [ha]	D _{tr0,1} I [km]	D _{tr0,1} II [km]	D _{tr0,1} III [km]	D _{tr0,1} IV [km]	D _{tr0,1} V [km]
Tradycyjna	50	342	322	298	328	322
UTU	50	347	327	303	333	345
Siewu bezp.	50	348	328	304	334	-

Źródło: opracowanie własne.

Okazuje się, że plantacja, aby zapewnić racjonalny przyrost energii powyżej wewnętrznej konsumpcji, musi znajdować się w maksymalnej odległości 350 km. Pozwalając na 20% zużycie dostępnej energii do transportu biomasy w celach przetwórczych odległość ta może być podwojona.

5.3.2. Modelowanie wpływu charakterystyk topologicznych plantacji rzepaku na wydajność energetyczną plantacji

W dotychczasowych wynikach zawarto najważniejsze wkłady efektywności energetycznej i obliczenia dla każdej praktycznej sytuacji wraz z analizą niektórych zależności. Produkcja biopaliw musi dać ewidentny zysk energii w postaci sumy nakładów energetycznych na różnych etapach produkcji, która musi być mniejsza niż ilość energii uzyskanej w biopaliwie.

Wkłady związane z transportem pomiędzy polami oraz polami a punktami przemysłowymi były uwzględnione w powyższym modelu. Ogólne rozważania nie dają informacji o konkretnych sytuacjach, co powoduje, iż rozwiązania muszą być uzyskane dla ściśle określonych charakterystyk topologii pól. Przedmiotem dalszego rozważania jest propozycja zastosowania symulacji komputerowej. Program jest dość ogólny i umożliwia wykonywanie obliczeń dla różnych sytuacji. Zaprezentowany poniżej model matematyczny pozwala na szczegółową ocenę wkładu energii zużywanej na dojazdy pomiędzy ośrodkami produkcji rolnej na wybranym przykładzie topologii gospodarstwa. Algorytm pozwala na obliczeń dla dowolnej konfiguracji i konkretnego wariantu. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że rozmiary pól oraz odległości między nimi określają wydatki energetyczne na uprawę. W opracowanym algorytmie wpływ energii włożonej na wydajność energetyczną zdefiniowano w sposób analogiczny do EROEI.

Rysunek 54 przedstawia schemat blokowy obliczeń uwzględniający jedną operację agrotechniczną przeprowadzoną na wszystkich rozważanych polach. Wskaźnik n numeruje pole, podczas gdy k numeruje liczbę kolejnych dni wtedy, kiedy jest to potrzebne. Liczba dni wynika z założenia, że czas pracy, nie może przekroczyć $t_{\max}$. Gdy $t_{\max}$ jest osiągnięte praca jest przerywana i maszyny wracają do bazy. Droga powrotna i ponownego dojazdu doliczana jest do przebytych odległości D_{out} . W obliczeniach przyjęto 5 jednakowych pól, na których operacje wykonywane są w identycznych konfiguracjach maszyn (określono $t_{\max} = 10$ h). Wyniki przedstawione w poniższych tabelach uwzględniają jedynie jedną operację agrotechniczną, a więc:

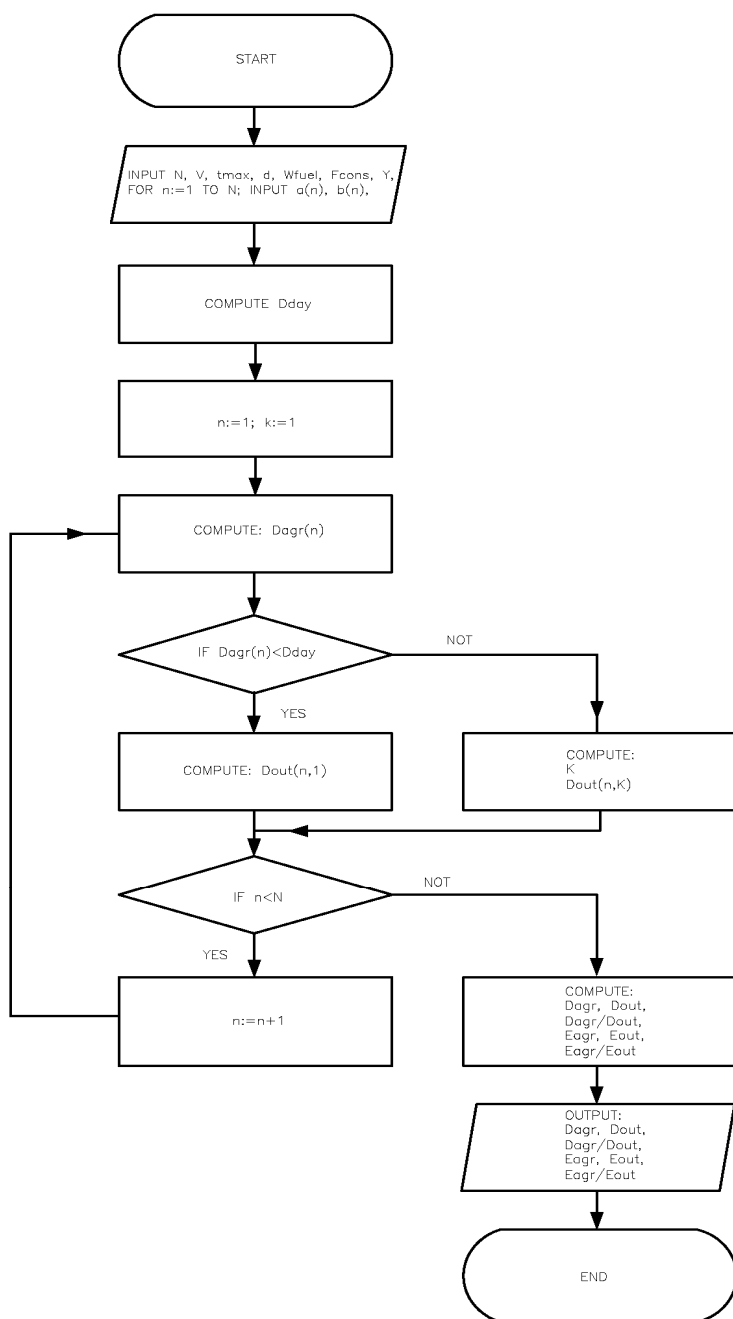
$$\eta_i = \frac{E_{bio}}{(E_{out} + E_{agr})_i}, \quad (25)$$

η_i – wydajność dla i -tej operacji,

E_{bio} – energia otrzymana w postaci biopaliwa,

E_{agr} – zużyta energia w i -tej operacji,

E_{out} – wydatki energii na przejazd na pola związane z operacją.



Rys. 54. Schemat blokowy algorytmu obliczeń dla jednej operacji

Źródło: opracowanie własne.

W przypadku, gdy operacje agrotechniczne różnią się od siebie, to dla i -tej operacji ostateczną wartość wyrazić można jako:

$$\eta_{tot} = \frac{E_{bio}}{\sum_{i=1}^I (E_{out} + E_{agr})_i} \quad (26)$$

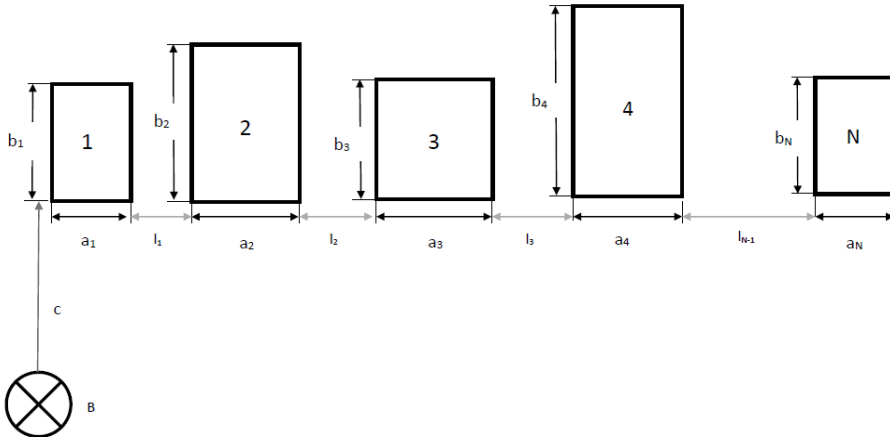
Ponieważ zakłada się, że wszystkie są operacje wykonywane w identyczny sposób ostateczna wydajność energetyczna dla wszystkich operacji można otrzymać w następujący sposób:

$$\eta_{tot1} = \frac{E_{bio}}{I \times (E_{out} + E_{agr})} \quad (27)$$

I – ilość operacji przy założeniu, że wszystkie są jednakowe.

Dlatego wydajność dla wszystkich operacji jest równa $\eta_{tot} = \eta_i / I$

Algorytm pozwala na wykonywanie obliczeń dla dowolnej charakterystyki topologii pól pokazanej na rys. 55 oddzielonych od siebie pewnymi odległościami i oddalonych od bazy o odcinek c . Wymiary pól, jak również odległości między nimi, zostały wprowadzone jako dane pierwotne. Ponadto szerokość pasa i prędkość maszyny jest dana dla każdej operacji.



Rys. 55. Charakterystyka topologiczna pól

Źródło: opracowanie własne.

Dopuszczalna dzienna odległość jest kolejnym warunkiem, która jest wyliczona jako iloczyn dopuszczalnego czasu pracy, t_{max} , i prędkości maszyny. T_{max} przyjęto 10 godzin, a prędkość 6 km/h. Jeżeli odległość ta jest osiągnięta, operator powinien wrócić do bazy przejeżdżając odpowiednią odległość poza polem i tą samą odległość kolejnego dnia, aby kontynuować pracę.

Energia zużywana obliczana jest w oparciu o przejechaną odległość i zużycie paliwa. Energia uzyskana z pola jest oceniana na podstawie wydajności plonów z jednostki powierzchni pola i wydajności paliwa z jednostki masy plonu. Na tym etapie obliczeń wydajność paliwa jest brana na podstawie średniej przemysłowej bez odróżniania technologii przetwarzania. Dwie wartości wydajności biopaliwa otrzymanego z ziarna rzepaku w odniesieniu do powierzchni plantacji (ha) zostały przyjęte: bardzo mała wynosząca 380 l/ha, druga o wiele większa wynosząca 1500 l/ha, co odpowiada maksymalnie wydajnej plantacji. Wartość energii wymagana do operacji agrotechnicznej, E_{agr} , jak również wartość energii potrzebnej do transportu pomiędzy polami, $E_{zuż}$, zostały obliczone przy użyciu średniego zużycia paliwa równego $P = 0,3$ l/km i wartości opałowej równej $W_{pal} = 36$ MJ/l. Obliczenia przeprowadzono dla plantacji rzepaku np. składającej się z pięciu pól o równej powierzchni, oddzielonych równymi odległościami. Kilka przypadków wielkości plantacji i odległości między nimi zostały uwzględnione. Wstępne dane dla obliczeń przedstawiono w tabeli 92.

Tab. 92. Wartości parametrów uwzględnianych w obliczeniach

$V = 6 \text{ km/h}$ $t_{max} = 10 \text{ h}$						
$1 \leq i \leq n$ $a_i = b_i$						
$n = 5$	$a_i = 0,1 \text{ km}$			$a_i = 0,5 \text{ km}$		
	$b_i = 0,1 \text{ km}$			$b_i = 0,5 \text{ km}$		
c [km]	1,0	5,0	10,0	1,0	5,0	10,0
l [km]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
l [km]	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
l [km]	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
l [km]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Źródło: opracowanie własne.

Wyniki obliczeń wykazują w sposób oczywisty, że odległość przejechana na polu zależy od obszaru pola i szerokości pasa obróbki. Całkowita odległość, D_{agr} , przejechana na polu, w przypadku pola o powierzchni $A = 0,01 \text{ km}^2$ i szerokości pasa obróbki 4 m wynosi 12,5 km i 100 km dla pasa obróbki 0,5 m. Podobne obliczenia dla powierzchni indywidualnego pola równego $0,25 \text{ km}^2$

dają całkowitą odległość równą 312,5 km dla szerokości pasa obróbki 4 m i 2500 km dla pasa obróbki 0,5 m.

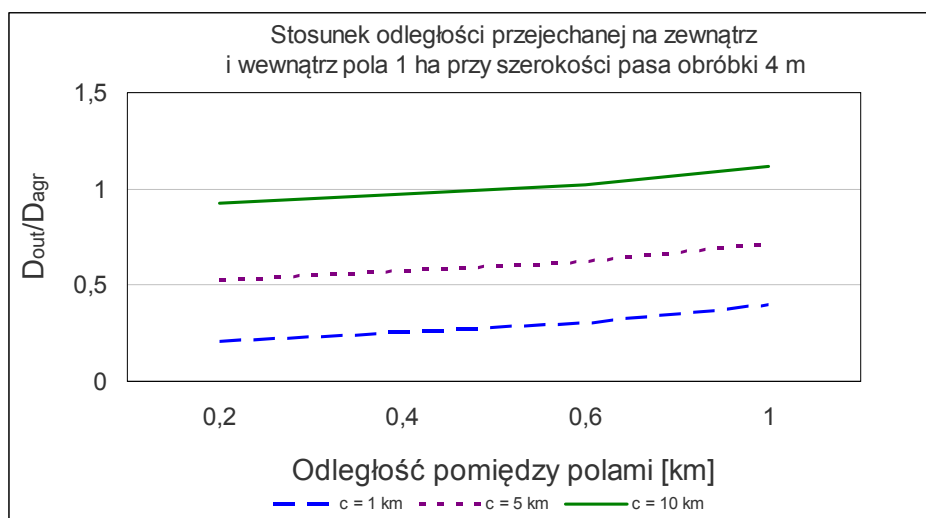
Widać wyraźnie, że wybór wyposażenia do pracy poważnie wpływa na przejechaną odległość. Tabela 93 przedstawia wyniki obliczeń dla odległości poza polami, D_{out} , dla układu 5 identycznych pól, każde o powierzchni, A , oddzielonej od siebie o odległość, l , i odległość, c , pomiędzy bazą, a pierwszym polem dla szerokości pasa obróbki $d = 4$ m. Porównano dwie plantacje o powierzchniach 0,01 km² (1 ha) i 0,25 km² (25 ha). Odległości na zewnątrz pól zwiększają się, gdy odległości między polami rosną. Jest również widoczne, iż te przejechane odległości zależą od wielkości pól. Wynika to z potrzeby powrotu do bazy, po osiągnięciu dopuszczalnego czasu pracy i ponownego dojazdu do miejsca, gdzie praca została przerwana w poprzednim dniu.

Tab. 93. Wartości D_{out} [km] dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 4$ m

$A, [km^2]$	0,01			0,25		
c	1	5	10	1	5	10
$l [km]$						
0,2	2,6	6,6	11,6	17,72	43,32	75,32
0,4	3,2	7,2	12,2	20,04	45,64	77,64
0,6	3,8	7,8	12,8	22,36	47,96	79,96
1	5,0	9,0	14,0	27,00	52,60	84,60

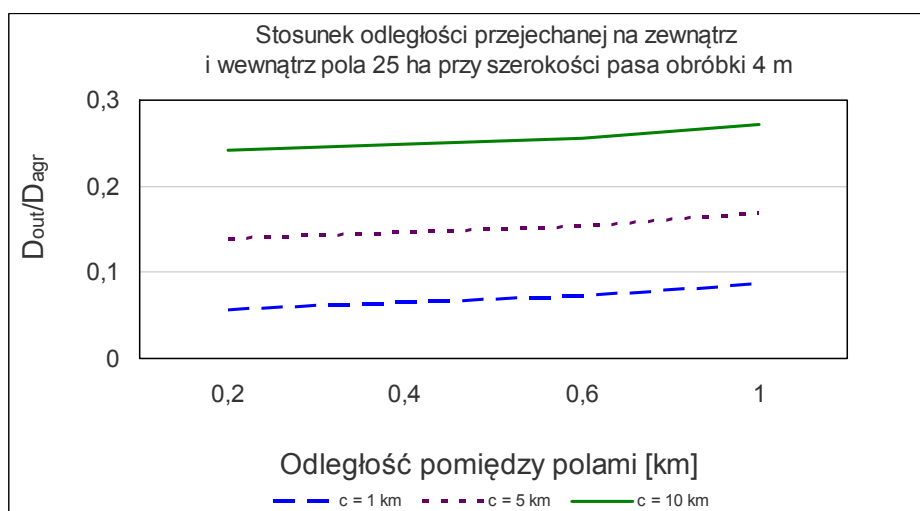
Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 56 przedstawia stosunek odległości przejechanych wewnątrz i na zewnątrz plantacji złożonej z pól o powierzchni 0,01 km² (1 ha), w przypadku, gdy szerokość pasa obróbki wyniosła 4 m jako funkcji odległości między polami i odległości pierwszego pola od bazy. Stosunek D_{out}/D_{agr} przyjmuje wartości pomiędzy 0,2 do 1,12 km, co wynika zarówno z odległości między polami i odległości od bazy. Ta ostatnia od bazy wydaje się być bardziej wyraźna. Podobne wyniki, dla drugiego wariantu, poszczególnych wielkości pól równych 0,25 km² (25 ha) przedstawiono na rys. 57. W tym wypadku wartości tego stosunku D_{out}/D_{agr} są zawarte pomiędzy 0,057 i 0,271 km. Wartości te są mniejsze niż poprzednie i nie przekraczają jedności. W tym przypadku są one również słabo zależne od odległości między polami, a raczej silniej od odległości pomiędzy bazą a pierwszym polem.



Rys. 56. Stosunek odległości przejechanej na zewnątrz i wewnątrz plantacji, D_{out}/D_{agr} , złożonych z pól o powierzchni 1 ha w zależności od odległości między plantacjami, l , dla różnych odległości od bazy, c , i szerokości pasa obróbki 4 m

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 57. Stosunek odległości przejechanej na zewnątrz i wewnątrz plantacji, D_{out}/D_{agr} , złożonych z pól o powierzchni 25 ha w zależności od odległości między plantacjami, l , dla różnych odległości od bazy, c , i szerokości pasa obróbki 4 m

Źródło: opracowanie własne.

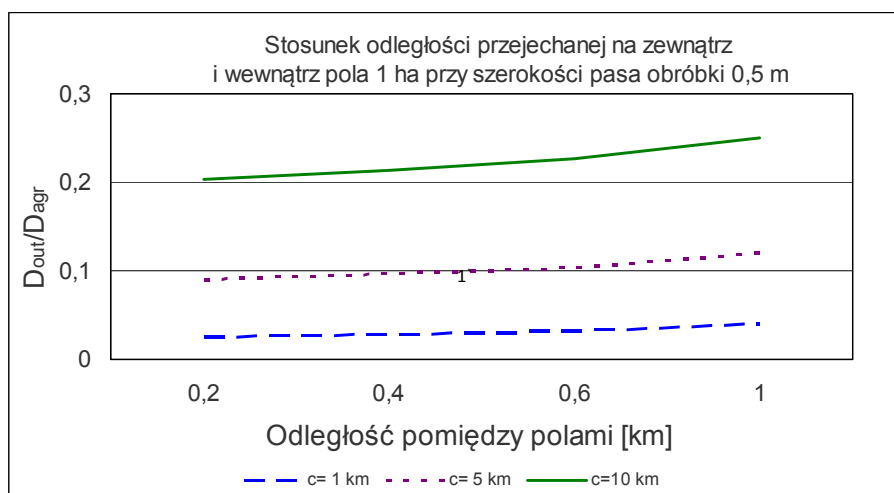
Z kolei tab. 94 przedstawia wyniki, gdy szerokość pasa obróbki wyniosła 0,5 m. Wyraźnie widać, że większy obszar pola przyczynia się do znacznego zwiększenia D_{out} . Odległości przejechane poza obszarem większych pól są znacznie wyższe niż w przypadku małej powierzchni pola.

Tab. 94. Wartości D_{out} [km] dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 0,5$ m

A_i [km ²]		0,01			0,25		
l [km]	c	1	5	10	1	5	10
0,2		2,4	6,4	11,4	92,18	234,58	412,58
0,4		2,8	6,8	11,8	103,26	245,66	423,66
0,6		3,2	7,2	12,2	114,34	256,74	434,74
1		4,0	8,0	13,0	136,50	278,90	456,90

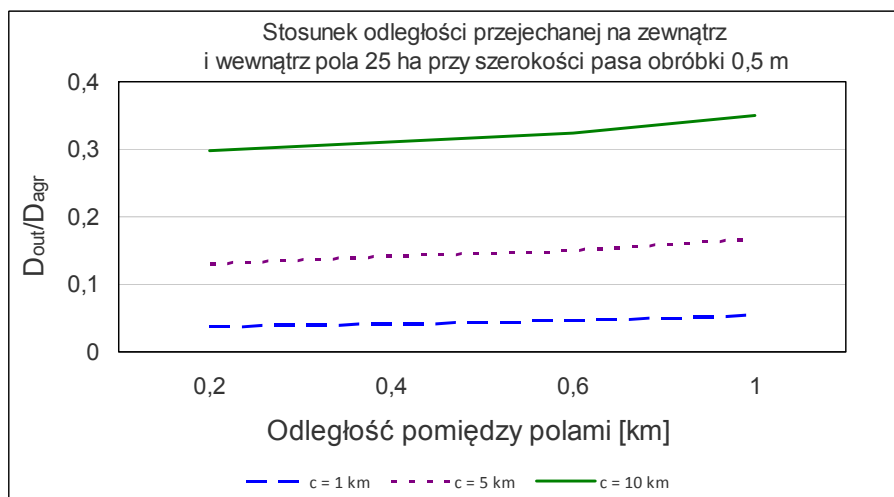
Źródło: opracowanie własne.

Taki wzrost D_{out} wynika z konieczności powrotu do bazy po osiągnięciu dopuszczalnego dziennego czasu pracy. Wykresy D_{out}/D_{agr} przedstawiono na rysunku 58 i 59. Wskazują one na podobną zależność (niewielki wzrost wraz ze wzrostem odległości między polami, jak również wzrost ze zwiększaniem się odległości od bazy). W tym przypadku nie ma istotnej różnicy pomiędzy wartościami obserwowanymi przy różnych rozmiarach poszczególnych pól plantacji. Wartości D_{out}/D_{agr} w obu przypadkach są mniejsze od jedności. Rezultat ten wynika z dużej odległości przejechanej na polu wtedy, gdy szerokość robocza jest mała 0,5 m. Ta przejechana odległość na polu jest duża, zatem odległości pomiędzy polami nie mają większego wpływu.



Rys. 58. Stosunek odległości przejechanej na zewnątrz i wewnątrz plantacji, D_{out}/D_{agr} , złożonych z pól o powierzchni 1 ha w zależności od odległości między plantacjami, l , dla różnych odległości od bazy, c , i szerokości pasa obróbki 0,5 m

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 59. Stosunek odległości przejechanej na zewnątrz i wewnątrz plantacji, D_{out}/D_{agr} , złożonych z pól o powierzchni 25 ha w zależności od odległości między plantacjami, l , dla różnych odległości od bazy, c , i szerokości pasa obróbki 0,5 m

Źródło: opracowanie własne.

Najważniejsze pytanie w tej pracy dotyczy ilości zużytej energii w trakcie operacji agrotechnicznych i transportu w porównaniu do ilości energii uzyskanej w formie biopaliwa. Oczywiście, ilość wydatku energetycznego podczas uprawy roślin zależy od odległości przejechanej, wewnątrz jak i na zewnątrz pól. W związku z tym ta ilość energii zależy od tych samych czynników, co i przejechane odległości. Tak jak wspomniano wcześniej, ilość energii uzyskanej z pola można łatwo oszacować na podstawie wielkości plonów (zależy również od sprawności systemu przemysłowego, który w tej pracy nie jest analizowany), dla której do obliczeń przyjęto dwie wartości graniczne. Oszacowanie energii przeznaczonej na przejazd poza polami dla przypadku, gdy szerokość robocza wynosi 4 m, podano w tabeli 95.

Tab. 95. Energia E_{out} [MJ] zużyta dla przejazdów na zewnątrz plantacji dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 4$ m

A_i [km ²]		0,01			0,25		
l [km]	c	1	5	10	1	5	10
0,2		28,1	71,3	125,3	191,37	467,86	813,46
0,4		34,6	77,8	131,8	216,43	492,91	838,51
0,6		41,0	84,2	138,2	241,49	517,97	863,57
1		54,0	97,2	151,2	291,60	568,08	913,68

Źródło: opracowanie własne.

Okazuje się, że energia zużyta poza polami, E_{out} , zależy zarówno od odległości, l – między polami i c – odległości od bazy, a przede wszystkim od wielkości pola. Ta ostatnia zależność wynika z konieczności powrotu do bazy po osiągnięciu dopuszczalnego czasu pracy. Wyniki uzyskane dla szerokości pasa obróbki 0,5 m przedstawiono w tab. 96. W obu rozmiarach plantacji wielkość ilości zużytej energii na zewnątrz pola zależy od odległości między polami i odległości od bazy. Jednak najsilniejszy wpływ wywiera wielkość plantacji, co ponownie może być wytłumaczone jako wpływ powrotów po osiągnięciu dopuszczalnego czasu pracy. Liczba dni i ilość powrotów jest znacznie wyższa, gdy obrabiany jest wąski pasek, co znacznie zwiększa przebyty dystans poza polami.

Tab. 96. Energia E_{out} [MJ] zużyta dla przejazdów na zewnątrz plantacji dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 0,5$ m

A_i [km ²] $\backslash$ l [km]	0,01			0,25		
	c 1	5	10	1	5	10
0,2	25,9	69,1	123,1	995,54	2533,46	4455,86
0,4	30,2	73,4	127,4	1115,21	2653,13	4575,53
0,6	34,6	77,8	131,8	1234,87	2772,79	4695,19
1	43,2	86,4	140,4	1474,20	3012,12	4934,52

Źródło: opracowanie własne.

W tabelach 97 i 98 pokazano sumę wydatków energii podczas pracy na polu i między polami. Wartości w tab. 97 przedstawiają niebyt silną zależność od odległości między polami, l , jak i odległości od bazy, c . Istotna różnica jest widoczna, gdy wartości dla małych plantacji są porównywane z wartościami dla dużych. Te drugie są znacznie wyższe. Różnica ta jest dużo bardziej wyraźna w przypadku wąskiego pasa obróbki tab. 98. Na podstawie wartości zaprezentowanych w powyższych tabelach, efektywność energetyczna dla pojedynczej operacji agrotechnicznej jest obliczona zgodnie z równaniem (25).

Tab. 97. Suma energii $E_{out} + E_{agr}$ [MJ] zużytych do pojedynczej operacji agrotechnicznej na zewnątrz i wewnątrz pól dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 4$ m

A_i [km ²] $\backslash$ l [km]	0,01			0,25		
	c 1	5	10	1	5	10
0,2	164	207	261	3567	3843	4189
0,4	170	213	267	3592	3868	4214
0,6	177	220	274	3617	3893	4239
1	189	233	287	3667	3944	4289

Źródło: opracowanie własne.

Tab. 98. Suma energii $E_{out} + E_{agr}$ [MJ] zużytych do pojedynczej operacji agrotechnicznej na zewnątrz i wewnątrz pól dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 0,5$ m

A_i [km ²]	0,01			0,25		
$\begin{matrix} c \\ l \text{ [km]} \end{matrix}$	1	5	10	1	5	10
0,2	1106	1150	1204	27996	29534	31456
0,4	1111	1154	1208	28116	29654	31576
0,6	1115	1158	1212	28235	29773	31696
1	1124	1167	1221	28475	30013	31935

Źródło: opracowanie własne.

Tab. 99. Stosunek energii zawartej w biopaliwie, E_{bio} , do sumy energii, $E_{out} + E_{agr}$, zużytych do pojedynczej operacji agrotechnicznej na zewnątrz i wewnątrz pól dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 4$ m i wydajność z pola wynosi 380 l/ha

A_i [km ²]	0,01			0,25		
$\begin{matrix} c \\ l \text{ [km]} \end{matrix}$	1	5	10	1	5	10
0,2	403,0	318,7	252,6	460,7	427,6	392,3
0,4	387,6	308,9	246,4	457,5	424,8	390,0
0,6	373,4	299,8	240,6	454,4	422,1	387,7
1	347,8	283,1	229,7	448,2	416,7	383,2

Źródło: opracowanie własne.

Tab. 100. Stosunek energii zawartej w biopaliwie, E_{bio} do sumy energii, $E_{out} + E_{agr}$, zużytych do pojedynczej operacji agrotechnicznej na zewnątrz i wewnątrz pól dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 0,5$ m i wydajność z pola wynosi 380 l/ha

A_i [km ²]	0,01			0,25		
$\begin{matrix} c \\ l \text{ [km]} \end{matrix}$	1	5	10	1	5	10
0,2	59,5	57,2	54,7	58,7	55,7	52,3
0,4	59,2	57,0	54,5	58,5	55,5	52,1
0,6	59,0	56,8	54,3	58,2	55,2	51,9
1	58,6	56,4	53,9	57,8	54,8	51,5

Źródło: opracowanie własne.

Dwie wartości energii uzyskanej z plantacji, E_{bio} , są brane pod uwagę tj. 380 l/ha i 1500 l/ha. Wyniki, dla przypadku małej wydajności plantacji, są przedstawione w tabelach 99 i 100 z uwzględnieniem szerokości pasa obróbki odpowiednio 4 m i 0,5 m. Uzyskane wartości η_1 zmieniają się od około 229 do ponad 460 dla różnych kombinacji parametrów w przypadku szerokości pasa obróbki 4 m i niskiej wydajności biopaliwa. Wyniki uzyskane w przypadku szerokości pasa obróbki 0,5 m i niskiej wydajności biopaliwa dają znacznie niższe wartości w zakresie od 50 do około 60.

Tab. 101. Stosunek energii zawartej w biopaliwie, E_{bio} , do sumy energii, $E_{out} + E_{agrs}$, zużytych do pojedynczej operacji agrotechnicznej na zewnątrz i wewnątrz pól dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 4$ m i wydajność z pola wynosi 1500 l/ha

A_i [km ²]		0,01			0,25		
l [km]	c	1	5	10	1	5	10
0,2		1591	1258	997	1819	1688	1549
0,4		1530	1220	973	1806	1677	1540
0,6		1474	1184	950	1794	1666	1531
1		1373	1118	907	1769	1645	1513

Źródło: opracowanie własne.

Wartości η_1 uzyskane w drugim skrajnym przypadku tj. wysokiej wydajności biopaliwa równej 1500 l/ha i szerokości pasa obróbki 4 m pokazano w tabeli 101. Wartości te wahają się od około 900 do około 1800, w zależności od struktury plantacji (rozmiary pól i odległości między nimi). Odpowiednie wartości wydajności η_1 są większe dla mniejszych pól. Jak to wynika z tab. 102 wartości sprawności, dla przypadku szerokości roboczej 0,5 m, są znacznie mniejsze niż poprzednie (4 m, tab. 102). Różnice między wartościami zawartymi w tab. 102 są znacznie mniej widoczne.

Jak wspomniano wcześniej, obliczenia przeprowadzone zgodnie z równaniem (25) odpowiadają całkowitym wydajnościom, η_1 , uzyskanego paliwa, E_{bio} , ale tak, jak gdyby tylko jedna operacja agrotechniczna była wykonywana podczas uprawy roślin. Nigdy nie jest tak w realnej sytuacji. Zazwyczaj kilka operacji agrotechnicznych jest koniecznych. Każda z operacji może wymagać różnych warunków dotyczących np. szerokości, zużycia paliwa itp. W celu uproszczenia obliczeń przyjęto, że te same warunki stosowane są we wszystkich operacjach. Dlatego wzór (27) może być stosowany do oceny wyniku końcowego.

Tab. 102. Stosunek energii zawartej w biopaliwie, E_{bio} , do sumy energii, $E_{out} + E_{agrs}$, zużytych do pojedynczej operacji agrotechnicznej na zewnątrz i wewnątrz pól dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 0,5$ m i wydajność z pola wynosi 1500 l/ha

A_i [km ²]	0,01			0,25		
c	1	5	10	1	5	10
l [km]						
0,2	235	226	216	232	220	207
0,4	234	225	215	231	219	206
0,6	233	225	215	230	218	205
1	231	223	213	228	217	204

Źródło: opracowanie własne.

Tab. 103. Porównanie stosunku energii zawartej w biopaliwie, E_{bio} , do sumy energii, $E_{out} + E_{agrs}$, zużytych dla operacji agrotechnicznych i przejazdów na zewnątrz i wewnątrz pól w funkcji liczby operacji wykonywanych dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 4$ m i wydajność z pola wynosi 380 l/ha i 1500 l/ha

Szerokość p. obróbki = 4 m			Wydajność = 380 l/ha			
A_i [km ²]	0,01			0,25		
c	1	5	10	1	5	10
l [km] = 0,2	403	318,7	252,6	460,7	427,6	392,3
Liczba operacji						
2	202	160	127	231	214	197
3	135	107	85	154	143	131
4	101	80	64	116	107	99
5	81	64	51	93	86	79
l [km] = 1	347,8	283,1	229,7	448,2	416,7	383,2
Liczba operacji						
2	174	142	115	225	209	192
3	116	95	77	150	139	128
4	87	71	58	113	105	96
5	70	57	46	90	84	77
Szerokość p. obróbki = 4 m			Wydajność = 1500 l/ha			
A_i [km ²]	0,01			0,25		
c	1	5	10	1	5	10
l [km] = 0,2	1591	1258	997	1819	1688	1549

Liczba operacji						
2	796	629	629	910	844	775
3	531	420	420	607	563	517
4	398	315	315	455	422	388
5	319	252	252	364	338	310
$l \text{ [km]} = 1$	1373	1118	907	1769	1645	1513
Liczba operacji						
2	687	559	454	885	823	757
3	458	373	303	590	549	505
4	344	280	227	443	412	379
5	275	224	182	354	329	303

Źródło: opracowanie własne.

Tab. 104. Porównanie stosunku energii zawartej w biopaliwie, E_{bio} , do sumy energii, $E_{out} + E_{agrs}$, zużytych dla operacji agrotechnicznych i przejazdów na zewnątrz i wewnątrz pól w funkcji liczby operacji wykonywanych dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 0,5 \text{ m}$ i wydajność z pola wynosi 380 l/ha i 1500 l/ha

Szerokość p. obróbki = 0,5 m	Wydajność = 380 l/ha					
$A_i \text{ [km}^2\text{]}$	0,01			0,25		
c	1	5	10	1	5	10
$l \text{ [km]} = 0,2$	59,5	57,2	54,7	58,7	55,7	52,3
Liczba operacji						
2	30	29	28	30	28	27
3	20	20	19	20	19	18
4	15	15	14	15	14	14
5	12	12	11	12	12	11
$l \text{ [km]} = 1$	58,6	56,4	53,9	57,8	54,8	51,5
Liczba operacji						
2	30	29	27	29	28	26
3	20	19	18	20	19	18
4	15	15	14	15	14	13
5	12	12	11	12	11	11

Badania własne

Szerokość p. obróbki = 0,5 m		Wydajność = 1500 l/ha				
A_i [km ²]	0,01			0,25		
c	1	5	10	1	5	10
I [km] = 0,2	235	226	216	232	220	207
Liczba operacji						
2	118	113	108	116	110	104
3	79	76	72	78	74	69
4	59	57	54	58	55	52
5	47	46	44	47	44	42
I [km] = 1	231	223	213	228	217	204
Liczba operacji						
2	116	112	107	114	109	102
3	77	75	71	76	73	68
4	58	56	54	57	55	51
5	47	45	43	46	44	41

Źródło: opracowanie własne.

6. Podsumowanie pracy badawczej

Zaprezentowane wyniki pokazują, że ilość energii uzyskiwanej z biopaliwa może znacznie przekraczać sumę energii, która jest potrzebna do przeprowadzenia procesów produkcji biomasy i konwersji na energię. Efektywność systemu produkcji biopaliw została zdefiniowana jako stosunek energii uzyskanej w postaci gotowego biopaliwa, do sumy energii zużytej we wszystkich procesach produkcyjnych niezbędnych do uzyskania tego biopaliwa. Na obecnym etapie pracy ograniczono się do szczegółowej analizy podsystemu rolnego, przy założeniu, że skala tego podsystemu jest uzależniona od wielkości produkcji podsystemu przemysłowego, którego wydajność tymczasowo przyjęto jako stałą odpowiadającą średniej wydajności przemysłu przetwórczego biopaliw.

W wyniku przeprowadzonych analiz wykazano, że wydajność energetyczna plantacji, w przypadku małej plantacji obejmującej jedno ciągle pole (np. produkcja na własny użytek, w której energia wymagana do transportu może być pominięta), nie zależy od wielkości obszaru uprawy, a jedynie zależy od charakterystyk stosowanych maszyn produkcyjnych i wydajności plonowania oraz odległości plantacji od przetworni przemysłowej. Wydajność ta, jak wykazano w przeprowadzonych obliczeniach, w wielu realnych plantacjach jest wyższa od jedności, co wskazuje na to, że uzysk energii jest wyższy od wkładów na uprawę. To uproszczone podejście może być uznane, jako oszacowanie górnej granicy wydajności.

W przypadku plantacji rozdrobnionej (równanie 24), do czynników zmniejszających efektywność należą wkłady energii potrzebne do przebycia dróg pomiędzy poszczególnymi polami (oczywiście zależne od odległości pomiędzy tymi polami). Ponadto wkłady te są tym większe im większe są poszczególne pola. Zależność ta wynika z konieczności, często wielokrotnych, powrotów do bazy po osiągnięciu maksymalnego dopuszczalnego czasu pracy. (Wartości tych wkładów mogą zależeć od przyjętej organizacji pracy). Wstępnie oceniono również wpływ energii zużytej na wyprodukowanie maszyn i innych środków produkcji (energia wbudowana, emergia) przy założeniu, że wkład tej energii jest zależny od stopnia zaangażowania poszczególnych środków produkcji w stosunku do pełnego okresu ich przydatności (do pełnego zużycia).

Szczegółowe obliczenia numeryczne przeprowadzono dla wartości charakterystyk liczbowych odpowiadających realnym sytuacjom. Opracowany teoretyczny model wydajności energetycznej plantacji rolnych przeznaczonych do produkcji biomasy na biopaliwa zawiera najważniejsze wkłady efektywności energetycznej i obliczenia numeryczne, w tym analizę niektórych zależności. Zgodnie z przedstawionym modelem ta efektywność mieści pomiędzy dziesięć a kilkaset zależności od różnych cech struktury i zachodzących procesów. Wśród tych cech najważniejszy wpływ wynika z wydajności maszyn rolniczych i wielkości plonów biopaliw z jednostki powierzchni plantacji. Zależność

wydajności biopaliwa od metod upraw rolniczych może występować, lecz dane na ten temat są niewystarczające i w konsekwencji wymagają dalszych badań. Dlatego też, w tej pracy, do obliczeń przyjęto dwie skrajne wartości, co stwarza szansę na oszacowanie wartości granicznych opisujących wydajność energetyczną. Zmienność pozostałych parametrów charakteryzujących strukturę plantacji (w tym przypadku przyjmowaną jako liniową) wpływa na uzyskaną efektywność w zakresie od 10% do 40%. Jednym ze zjawisk, które odgrywają znaczną rolę, jest zależność całkowitej pokonywanej odległości poza polami od powierzchni pola jak i szerokości operacyjnej. Ta zależność wynika z założenia, że maszyny powracają do bazy po przepracowaniu dopuszczalnego czasu pracy. Założenie dotyczące innej organizacji w pracy, np. maszyny pozostają na polu, i tylko ludzie są transportowani do bazy, spowoduje inne wyniki. Oczekiwane różnice nie powinny być bardzo duże, ponieważ stanowiłyby one część tych skutków, które zostały tu oszacowane jako mieszczące się pomiędzy 10% do 40%. Także zmiana struktury plantacji np. na gwieździstą może przynieść pewne różnice wyników. W związku z tym, optymalizacja części rolnej systemu produkcji biopaliw powinna przede wszystkim obejmować właściwy dobór wydajności maszyn, przy jak najwyższej wydajności pól, rozsądnej organizacji pracy i transporcie towarów. Oznacza to, że odpowiedni dobór technologii jest ważny i powinien być brany pod uwagę w konkretnych decyzjach. Niektóre inne aspekty, takie jak badanie podsystemu przemysłowego samego i sprzężenia pomiędzy podsystemami rolnym i przemysłowym będzie tematem oddzielnych badań.

Uzyskane wyniki prowadzą do następujących wniosków. Skonstruowany model matematyczny pozwalający na analizę oraz obliczenie efektywności energetycznej dla założonego subsystemu rolnego. W modelu uwzględniono wielkości pól plantacji, odległości pomiędzy polami, odległość od bazy – głównej lokalizacji farmy, odległość od zakładu przetwórczego oraz charakterystyki operacyjne urządzeń agrotechnicznych (szerokość pasa obróbki, jednostkowe zużycie paliwa). Uwzględniono także wartość opałową paliwa używanego w procesach agrotechnicznych oraz wartość opałową uzyskiwanego biopaliwa. Do oceny energii uzyskiwanej w postaci biopaliwa wykorzystano wartości wydajności upraw oraz średnią wydajność biopaliwa uzyskiwaną w przemyśle z jednostki masy produktu rolnego. Oceniono również wpływ ubytku emergii – energii wbudowanej w urządzenia agrotechniczne i inne środki produkcji wynikającego z zużycia tych środków produkcji w procesach agrotechnicznych. W pewnym stopniu w obliczeniach numerycznych uwzględniono również aspekt organizacji produkcji polegający na przyjęciu określonej długości dnia roboczego i konieczności powrotu z pola do bazy po osiągnięciu tego czasu pracy. Powoduje to konieczność przebycia dodatkowej drogi poza polem w kierunku do bazy, a następnego dnia powrotu do miejsca, w którym pracę przerwano.

Ogólna postać uzyskanych równań ma zastosowanie do każdego rodzaju upraw energetycznych, zaś obliczenia numeryczne przeprowadzono dla różnych

wariantów upraw rzepaku przeznaczonego do wykorzystania ziarna do produkcji bioestru metylowego używanego jako paliwo, bądź składnik paliwa do silników wysokoprężnych. Część obliczeń prowadzono dla konkretnych maszyn i konkretnych technologii produkcji, zaś inne przy założeniu charakterystyk odpowiadających powyższym, ale nie przypisywanych konkretnym urządzeniom. Założono również, że tylko ziarno uzyskiwanego rzepaku jest wykorzystywane do celów produkcji energetycznej, zaś pozostałe części roślin są zagospodarowywane w celach agrotechnicznych.

Uzyskane wyniki wskazują, że w przypadku plantacji o niewielkich rozmiarach i niewielkiej wydajności plonu (co praktycznie odpowiada produkcji na własny użytek) przejazdy poza polem są zaniedbywalne, a efektywność energetyczna nie zależy od rozmiarów pola, a jedynie zależy od charakterystyk maszyn produkcyjnych. Wynik ten może być traktowany jedynie jako pierwsze przybliżenie modelu i jego stosowność jest ograniczona do małych plantacji. Obliczenia numeryczne dla takich plantacji pokazują, że efektywność energetyczna mieści się w granicach od ok. 6.0 do ok. 30,5 i, w przyjętych granicach wielkości pól, nie zależy od wielkości pola, a jedynie od rodzaju zastosowanej technologii produkcji. Tym niemniej we wszystkich przypadkach ilość energii uzyskiwanej w postaci biopaliwa wyraźnie przewyższa ilość energii włożonej w przeprowadzenie zabiegów technologicznych podczas uprawy. Uwzględnienie energii wbudowanej w przypadku technologii o najwyższym zaangażowaniu technicznych środków produkcji powoduje zmniejszenie efektywności o ok. 30%. Przy założeniu, iż do zakładu przemysłowego transportowane jest ziarno rzepaku, oparciu o ilość wyprodukowanego ziarna oraz, założeniu, że energia zużyta na transport ziarna nie może być większa niż 10% zysku energii, maksymalną dopuszczalną odległość zakładu przetwórczego od plantacji oceniono na 350 km. Z pokazanych danych wynika, że dobór technologii, a także racjonalnej odległości dostawy ziarna może zapewnić energetyczną opłacalność (efektywność) uprawy.

W przypadku większych plantacji, które muszą zaistnieć w systemach produkcyjnych dużej skali, założono, iż trudno stworzyć bardzo wielką plantację o jednym ciągłym polu, a więc w związku z tym pojawiają się przejazdy pomiędzy polami. Oczywiście energia zużyta na te przejazdy zmniejsza efektywność energetyczną plantacji. Ze względu na to, iż nie jest możliwe zaproponowanie ogólnego wzoru dla takiej sytuacji – odległość pomiędzy polami nie jest jednoznacznie funkcją wielkości pól – można jedynie zaproponować obliczenia numeryczne dla konkretnej struktury plantacji, bądź obliczenia modelowe przy założeniu określonych długości dróg i badaniu wpływu zmiany długości tych dróg. Przeprowadzone obliczenia numeryczne dla przykładowego układu pól i odległości pomiędzy nimi pokazują, że energia zużyta na przejazdy pomiędzy polami rośnie zarówno ze wzrostem odległości pomiędzy polami, jak również ze wzrostem wielkości pól. Fakt ten wiąże się z koniecznością powrotu do bazy po osiągnięciu dopuszczalnego czasu pracy i w związku z tym wielokrotnego

przebywania odcinków poza polem. Wydajność energetyczna plantacji zależy od charakterystyk struktury plantacji oraz liczby operacji agrotechnicznych i ostatecznie dla przykładowego układu pól otrzymuje się zakres wydajności energetycznej zawarty pomiędzy 11 a 30 dla mniej korzystnego wariantu wydajności plonu oraz w zakresie od 40 do 120 dla bardziej korzystnego wariantu wydajności plonu.

Uzyskane wyniki wskazują, że przy rozsądnym doborze technologii produkcji i dążeniu do zwiększenia wydajności plantacji poprzez zastosowanie odpowiednich środków agrotechnicznych możliwe jest uzyskanie znacznej wartości efektywności energetycznej.

Należy pamiętać, że przemianom zachodzącym w podsystemie przemysłowym także towarzyszy zapotrzebowanie na energię zmniejszające ogólną efektywność systemu. Sugeruje to więc konieczność wyboru wariantów możliwie najkorzystniejszych w obu podsystemach.

Korzystny wariant agrotechniczny jest porównywalny z korzystnymi wariantami pozyskiwania energii z paliw kopalnych, co oznacza, że biomasa może rzeczywiście stanowić dobry substytut paliw kopalnych. Wydaje się również, iż w dalszym ciągu istnieją rezerwy np. w organizacji produkcji, które pozwoliłyby na zmniejszenie zużycia energii w produkcji rolnej i tym samym uzyskanie jeszcze nieco wyższych wskaźników efektywności.

Proponowany model i algorytm obliczeniowy może być zastosowany również do innych typów upraw biomasy i wykorzystywany do optymalizacji efektywności także innych upraw. Badania tego typu będą stanowiły przedmiot dalszych prac autorki obecnej pracy.

6.1. Wnioski uogólniające

I. Zbudowany model matematyczny pozwala na ilościową ocenę wpływu różnych czynników produkcyjnych na efektywność energetyczną.

II. Z przeprowadzonych obliczeń wynika:

1. Efektywność energetyczna podsystemu rolnego zależy od:
 - a) parametrów technicznych zastosowanych maszyn,
 - b) odległości przejechanej na polu podczas operacji agrotechnicznych,
 - c) liczby operacji agrotechnicznych (a więc technologii produkcji),
 - d) odległości przebytych pomiędzy polami zależnej od stopnia rozdrobnienia, plantacji i wielkości poszczególnych pól,
 - e) odległości plantacji od zakładu przetwórczego – transport ziarna na odległość ok. 350 km pochłania ok. 10% energii w wyprodukowanym biopaliwie.
2. Efektywność energetyczna zależy od skali produkcji podsystemu przemysłowego, która wymusza odpowiednią skalę (wielkość) plantacji i tym samym decyduje o zużyciu paliw (energii) podczas operacji agrotechnicznych i transportu.

III. Oceniona w pracy efektywność energetyczna zależy od:

1. Skali, zmieniając się w granicach 6–30.
2. Od parametrów maszyn, zmieniając się w granicach 5,89–30,46. (tab. 84)

IV. Z przeprowadzonych obliczeń można także wysnuć ogólniejszy wniosek:

- a) model może być użyty do analizy innych, niż rzepak, plantacji energetycznych. Wówczas mogą być rozpatrywane inne warianty energetycznego wykorzystania plonów, np. ziarno kukurydzy na bioetanol, a łądygi na biogaz.
- b) ważnym zastosowaniem modelu może być optymalizacja produkcji w konkretnej plantacji

Plany przyszłych badań:

1. Opracowanie przyjaznej dla użytkownika wersji programu do obliczeń modelowych.
2. Opracowanie modelu podsystemu przemysłowego.
3. Dokonanie synchronizacji modeli obydwu podsystemów.

Załącznik

Wyniki zamieszczone w załączniku stanowią wersję publikacji²²⁵ uaktualnioną poprzez uwzględnienie zaistniałych zmian cen surowców i paliw.

1. Produkcja biodiesla w warunkach indywidualnego gospodarstwa rolnego

Dotychczas przeprowadzone przez autorkę badania wytwarzania biopaliwa w wybranym gospodarstwie rolnym dostarczyły danych odnośnie wydajności zarówno w aspekcie produkcji rolnej surowca, jak i wydajności oraz zużycia energii w prostym procesie trans-estryfikacji. Poniższy przykład dotyczy rocznej produkcji biodiesla przy 2-hektarowym areale upraw rzepaku ozimego na podstawie uzyskanych rzeczywistych plonów. Przedstawiona analiza studium przypadku opłacalności została przeprowadzona na podstawie gospodarstwa rolnego (woj. podlaskie). Podjęto próbę ustalenia kosztu wytworzenia biodiesla (przy wykorzystaniu własnych surowców i materiałów), analizy opłacalności produkcji, zbadania kosztów generowanych przez procesy produkcji biodiesla.

Agrotechnika stosowana w badanym gospodarstwie:

- nasiona rzepaku ozimego, odmiana: Lisek, Bosman,
- uprawa na glebach klasy: V (Lisek); IVa, IVb (Bosman),
- płodozmian – wysianie rzepaku ozimego co roku na innym obszarze pola (łącznie 2 ha), rotacja przeprowadzana jest w cyklach 3 lub 4-letnich,
- uprawa: przedplon (mieszanki traw z koniczyną), wapnowanie (w przypadku zakwaszonej ziemi co 6 lat), talerzowanie (przed wysianiem rzepaku), bronowanie, nawożenie obornikiem (co 3 lata, 1–2 tyg. przed posianiem), oprysk obornika użyźniaczem doglebowym, orka siewna, jesienią przed siewem zastosowanie nawozu wieloskładnikowego Grantar R NPK (CaMgS) 3–9–19–(5–4–21), bronowanie, wysiew (najpóźniej do 20 sierpnia, 4–5 kg/ha nasion, głębokość siewu do 2 cm, rozstaw między rzędami 12 cm i ok. 100 szt./m²), wałowanie (1–2 dni po zasiewie), na rosnący rzepak, wiosną użycie mocznika granulowanego 46%,
- ochrona roślin: jesienią, przed wschodem rzepaku zastosowanie herbicydu Triflur 480 EC (niszczy chwasty w fazie ich kiełkowania), herbicydy stosowane wiosną: po wschodach rzepaku Galera 334 SL (środek chwastobójczy

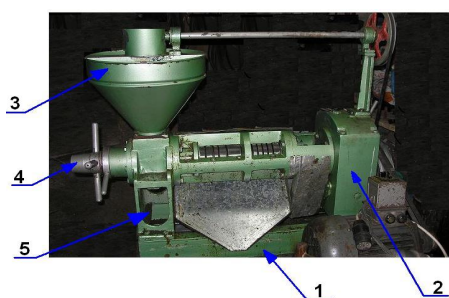
²²⁵ O. A. Orynych, *Produkcja biodiesla na własny użytek w gospodarstwie rolnym szansą na przetrwanie w kryzysie*, [W:] Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, nr 231, 2011, s. 308–325.

stosowany po ruszeniu wegetacji do fazy wytworzenia pąków kwiatowych), w fazie kwitnienia Talstar 100 EC (środek przedziorkobójczy i owadobójczy), od fazy zielonego pąka do początku fazy kwitnienia Pictor 400 SC (środek grzybobójczy),

- wczesnym latem po osiągnięciu pełnej dojrzałości nasion (wilgotność ok. 14%) zbiór jednofazowy rzepaku kombajnem ciągnikowym,
- suszenie ziarna w specjalnych pomieszczeniach do uzyskania wilgotności ok. 10%,

Zastosowanie takiej agrotechniki pozwala na uzyskanie plonu na poziomie 3 t/ha, co daje 6 t przy 2-hektarowym areale uprawy z przeznaczeniem na biodiesel (na własne potrzeby).

Do produkcji biodiesla używa się następujących surowców: olej rzepakowy (po wtłoczeniu z nasion rzepaku), alkohol metylowy i katalizator w postaci wodorotlenku potasu (KOH). Olej otrzymywany jest poprzez wytłaczanie nasion rzepakowych w prasie do tłoczenia oleju (metoda na „zimno” rys. 1).



1 – korpus prasy, 2 – przekładnia, 3 – zbiornik /zasobnik, 4 – śruba prasy, 5 – korpus mechanizmu.

Rys. 1. Prasa do tłoczenia oleju

Źródło: opracowanie własne.

Tab. 1. Parametry techniczne prasy

Wydajność	3 t/24 h
Moc silnika	5,5 kW
Prędkość obrotu śruby	40–50 obr/min.
Przekładnie w skrzyni biegów	19/42 x 19/57 = 1 : 6.63
Wymiary gabarytowe (wys./szer./dł.) [mm]	1020 x 540 x 1320
Waga	330 kg
Koszt prasy	19200 zł ²²⁶

Źródło: opracowanie własne.

²²⁶ Koszt zakupu prasy w badanym gospodarstwie.

Surowiec, w postaci wysuszonych ziaren rzepakowych (ok. 10% wilgotności), z kosza zasypowego wsypywany jest do komory wytłaczającej, skąd przesuwany jest przez obrót śruby. Tarcie między ziarnami a śrubą oraz pomiędzy cząsteczkami ziarna powoduje wzrost ciśnienia w komorze tłoczenia. Ziarna podawane są wzdłuż śruby i po odcisnięciu wyrzucane są w formie płatków (tzw. makuchy rzepakowe o temperaturze 40–50°C). W celu zwiększenia wydajności procesu makuchy są dwukrotnie przepuszczane przez prasę do tłoczenia. Cząstki ziarna przemieszczają się wzdłuż śruby, co wpływa na wzrost temperatury potrzebnej podczas tłoczenia (prowadzącej do zmiany struktury białka, podwyższenia plastyczności, rozkładu koloidu).

Wydajność procesu tłoczenia 1 t rzepaku:

- wytłoczenie czystego oleju z 1 t rzepaku = 50 kWh prądu,
- 1 t rzepaku $\Rightarrow$ 350 kg czystego oleju, którego objętość = 380 l,
- z 1 ha, przy wydajności 3 t/ha, otrzymuje się 1140 l oleju,
- 1 t rzepaku $\Rightarrow$ 650 kg makuchu rzepakowego,
- z 1 ha, przy wydajności 3 t/ha, otrzymuje się 1950 kg ($\approx$ 2 t) makuchu.

W procesie tłoczenia olej pozyskiwany jest z wydajnością 35% w stosunku o masy użytego ziarna, resztę stanowią makuchy. Zwiększenie udziału oleju o ok. 3%, w bilansie procesu tłoczenia, jest możliwe poprzez odzyskanie części oleju z makuchu, który jest zawieszany w lnianym worku. Makuchy rzepakowe (rys. 2) stanowią produkt uboczny, który może być wykorzystany jako pasza dla bydła i drobiu. Wartość odżywcza makuchu z własnego tłoczenia (ok. 2 t uzyskiwane z 1 ha), o zawartości powyżej 30% białka i ok. 15% oleju, odpowiada 2,5 t przemysłowej, poekstrakcyjnej śruty rzepakowej o obniżonej wartości odżywczej chemicznie wypłukanej z oleju.



Rys. 2. Makuchy rzepakowe (wytłoki)

Źródło: opracowanie własne.

Wytłoczony olej rzepakowy wlewany jest do kadzi (w celu sedymentacji). Po czterech dniach olej poddawany jest procesowi estryfikacji w reakcji mieszaniny oleju z alkoholem metylowym w obecności KOH jako katalizatora. W wyniku tego procesu, po przefiltrowaniu, otrzymywany jest biodiesel i gliceryna.

Do dużego zbiornika estryfikatora wlewa się 300 l oleju rzepakowego, gdzie jest on podgrzewany przy pomocy grzałek elektrycznych (2 grzałki po 4 kWh) do temperatury 54°C. Jednocześnie włączana jest pompka (0,5 kWh), która miesza podgrzewany olej i tym samym zapobiega jego przypaleniu. Z kolei do mniejszego zbiornika dodawany jest metanol w ilości 12% (36 l) oraz katalizator KOH w proporcji 0,6% tj. 1,8 kg w stosunku do 300 l oleju. Składniki tak są dobrane, aby powstający biodiesel miał środowisko obojętne (jest to najbardziej korzystne dla silnika). Różnice w proporcjach komponentów chemicznych zależą od stopnia kwasowości oleju rzepakowego (wytłoczony olej charakteryzuje się niską kwasowością i nie wymaga dużych ilości katalizatora). Katalizator KOH miesza się z metanolem i rozpuszcza, w wyniku czego wydziela się duża ilość ciepła, co nagrzewa mniejszy zbiornik do temperatury 45°C. Na osiągnięcie wymaganych temperatur zbiorniki estryfikatorów potrzebują ok. 1,2 h, po czym samoczynnie się wyłączają. Następnie zawory ustawiane są w taki sposób, by pompa zasysała jednocześnie podgrzany olej i w odpowiedniej proporcji mieszaninę katalityczną (proces trwa ok. 30 min.), gdzie temperatura oleju wzrasta z 54°C do 56°C na skutek zachodzącej reakcji estryfikacji. W czasie łączenia się obu związków wytrąca i oddziela się gliceryna oraz powstaje metyloester. Towarzyszy temu obniżenie lepkości i wzrost liczby cetanowej z 35 do ok. 53. Całość mieszaniny reakcyjnej jest wpompowana do większego zbiornika. Dla lepszego wymieszania składników proces jest powtarzany i zajmuje kolejne ok. 30 min. Proces estryfikacji trwa ok. 2 h.



Rys. 3. Instalacja do produkcji estrów PEM-300

Źródło: opracowanie własne.

Tab. 2. Parametry techniczne estryfikatora

Wydajność	300 l/cykl
Moc	12 kW
Wymiary gabarytowe (wys./szer./dł.) [mm]	1800 x 710 x 1300
Materiał	stal kwasoodporna
Koszt estryfikatora	16000 zł ²²⁷

Źródło: opracowanie własne.

Po estryfikacji należy odczekać 1–2 doby, aby dokonał się proces sedymentacji (trwałe rozwarstwienie powstałych związków na gęstą, oleistą glicerynę koloru ciemnobrązowego, która osiada na dnie zbiornika oraz gotowy biodiesel znajdujący się nad frakcją glicerynową, rys. 4). Brak zanieczyszczeń i właściwe rozwarstwienie substancji świadczy o prawidłowo przeprowadzonych procesach.

²²⁷ Koszt zakupu estryfikatora w badanym gospodarstwie.



Rys. 4. Rozwarstwienie związków na metyloester i glicerynę

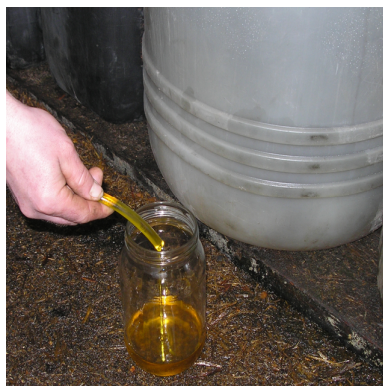
Źródło: opracowanie własne.

Kolejny etap to spuszczenie powstałej gliceryny ($C_3H_5(OH)_3$ ²²⁸). Do pojemnika filtru (rys. 5) zakładany jest polipropylenowy filtr sznurkowy 5–20 mikronów, przez który wypompowywany jest powstały biodiesel z estryfikatora do przygotowanych pojemników na paliwo (rys. 6). Suma objętości substratów (olej rzepakowy + metanol + KOH) przed reakcją jest ok. 12% większa od objętości oleju rzepakowego. Objętość powstałej gliceryny, stanowiącej produkt uboczny reakcji, wynosi 15%. Stąd wynika, że ilość powstałego biodiesla uzyskanego w wyniku reakcji jest ok. 3% mniejsza od uzyskanej objętości oleju.



Rys. 5. Pojemnik estryfikatora na filtr sznurkowy

Źródło: opracowanie własne.

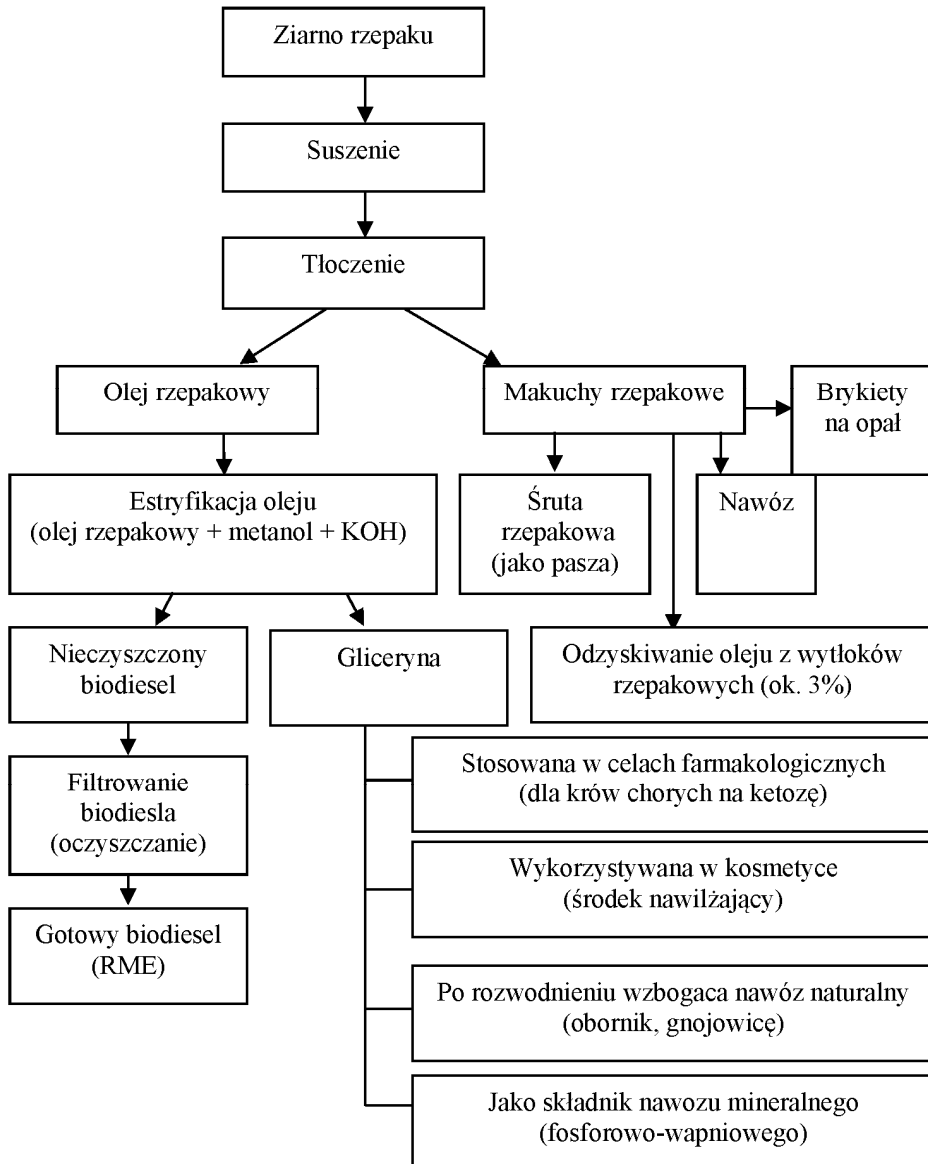


Rys. 6. Gotowy biodiesel

Źródło: opracowanie własne.

²²⁸ *Biodiesel Production and Quality*, April 2007, s. 1–4.

Schemat produkcji biodiesla z nasion rzepaku, produkty uboczne i ich zastosowanie przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Schemat produkcji biodiesla i sposoby zagospodarowania produktów ubocznych w badanym gospodarstwie

Źródło: opracowanie własne.

2. Koszt produkcji biodiesla w gospodarstwie rolnym

Na podstawie danych uzyskanych z badanego gospodarstwa określono następujące etapy produkcji i związane z nimi koszty.

I) Tłoczenie

W wyniku procesu tłoczenia 1 t rzepaku w gospodarstwie rolnym otrzymuje się:

- 350 kg czystego oleju $\Rightarrow$ 380 l
- 650 kg makuchu rzepakowego

Koszt tłoczenia 1 t rzepaku na czysty olej wymaga:

- 50 kWh prądu, cena za 1 kWh = 0,4 zł
- $50 \text{ kWh} \times 0,4 \text{ zł/kWh} = 20 \text{ zł}$ (1 t = 380 l)

Koszt tłoczenia 300 l oleju rzepakowego wynosi 15,79 zł

II) Estryfikacja

Koszt estryfikacji 300 l czystego oleju rzepakowego wymaga:

- 10 kWh $\Rightarrow 10 \text{ kWh} \times 0,4 = 4 \text{ zł}$
- zakup komponentów:
 - metanol w ilości 12% (w stosunku 300 l oleju),
 $300 \text{ l} \times 0,12 = 36 \text{ l}$
 $36 \text{ l} \times 3,0 \text{ zł/l} = 108 \text{ zł}$
 - KOH w ilości 0,6% (w stosunku 300 l oleju),
 $300 \text{ l} \times 0,006 = 1,8 \text{ kg}$
 $1,8 \text{ kg} \times 5,5 \text{ zł/kg} = 9,9 \text{ zł}$

III) Koszt pozyskania 1 l oleju z wykorzystaniem własnego surowca

- cena 1 t rzepaku w okresie żniw = 1280 zł
- cena ze sprzedaży makuchu = 925 zł
 380 l oleju
 1t rzepaku (1280 zł)
 650 kg makuchu ($1000 \text{ kg} = 925 \text{ zł}$; $650 \text{ kg} = 601,25 \text{ zł}$)
- $1280 \text{ zł} - 601,25 \text{ zł} = 678,75 \text{ zł}$ (koszt pozyskania 380 l oleju po sprzedaży makuchu).

Stąd koszt pozyskania 300 l oleju po sprzedaży makuchu = 535,86 zł. Z 300 l oleju otrzymywane jest ~ 97% biopaliwa tj. 291 l.

IV) Koszt wyprodukowania 1 l biodiesla w gospodarstwie rolnym (I + II + III)

$15,79 \text{ zł (I)} + 4 \text{ zł (II)} + 108 \text{ zł (II)} + 9,9 \text{ zł (II)} + 535,86 \text{ zł (III)} = 673,55 \text{ zł}$
 $673,55 \text{ zł} / 291 \text{ l} = 2,31 \text{ zł/l}$

3. Analiza opłacalności produkcji biodiesla w gospodarstwie rolnym

I) Koszt produkcji własnej biodiesla z uprawy rzepaku (2 ha) w stosunku do cen rynkowych (bez uwzględnienia wydatków związanych z uprawą rzepaku)

a) Z 2 ha otrzymywane jest 6 t surowca, z którego po procesie tłoczenia uzyskuje się 2280 l oleju. Po procesie estryfikacji ilość biodiesla zmniejsza się o ok. 3%. Stąd:

$$2280 \text{ l} \times 0,97 = 2211,6 \text{ l}$$

$$2211,6 \text{ l} \times 2,31 \text{ zł/l} = 5108,79 \text{ zł (koszt wytworzenia biodiesla z 2 ha)}$$

b) Zakup ON na stacji:

$$2211,6 \text{ l} \times 4,64 \text{ zł/l}^{229} = 10261,82 \text{ zł}$$

c) Zysk z produkcji własnej biodiesla w porównaniu z zakupem paliwa na stacji:
 $10261,82 \text{ zł} - 5108,79 \text{ zł} = 5153,03 \text{ zł}$

II) Koszt produkcji własnej biodiesla z uprawy rzepaku (2 ha) w stosunku do cen rynkowych (z uwzględnieniem wydatków związanych z uprawą rzepaku)

Koszt uprawy 1 ha rzepaku:²³⁰

a) Materiał siewny: zakup nasion ok. 4–5 kg/ha

$$1000 \text{ kg} = 1280 \text{ zł}$$

$$5 \text{ kg/ha} \times 1,28 \text{ zł/kg} = 6,4 \text{ zł/ha}$$

b) Koszty finansowe związane z uprawą rzepaku

Tab. 3. Przygotowanie ziemi pod uprawę rzepaku

Uprawa rzepaku*	Ilość godzin pracy ciągnika
Przedplon (np.: mieszanki traw z koniczyną jako pasza dla bydła, „rekompensująca” wydatki związane z wysiewem przedplonu)	-
Wapnowanie (ok. 3 t/ha = 300 zł) – stosować w przypadku zakwaszonej ziemi co 6 lat w rozbiu na 1 rok uprawy $300/6 = 50 \text{ zł}$	3 h/6 lat = 0,5 h
Talerzowanie (przed posianiem rzepaku)	1,5 h
Bronowanie	0,5 h
Obornik z gospodarstwa co 3 lata ok. 30 t/ha	12 h/3 lata = 4 h
Oprysk użyźniaczem doglebowym 1 l/3ha = 100 zł/l (33 zł/ha), co 3 lata na obornik: $33/3 = 11 \text{ zł}$	0,6 h/3 lata = 0,2 h
Orka siewna	2,5 h
Nawóz – przed wysiewem rzepaku jesienią nawóz wieloskładnikowy Grantar R NPK (CaMgS) 3–9–19–(5–4–21), 1 t = 1020 zł, stąd: 120 kg/ha = 122,4 zł	0,8 h

²²⁹ cena ON na stacji Statoil. Stan z dnia 25.02.2015 r.

²³⁰ koszt uprawy 1 ha rzepaku – dane z badanego gospodarstwa

Uprawa rzepaku *	Ilość godzin pracy ciągnika
Bronowanie	0,5 h
Wysiew rzepaku 6,4 zł	1,5 h
Walowanie 1–2 dni po wysianiu	0,5 h
Nawóz – wiosną co roku na rosnący rzepak: mocznik granul. 46% 1 t = 1140 zł, stąd: 100 kg/ha = 114 zł	0,5 h
Opryski: Triflur 480 EC (1,25 l/ha) – cena 130 zł/5l = 32,5 zł Galera 334 SL (0,25 l/ha) – cena 350 zł/l = 87,5 zł Talstar 100 EC (0,1 l/ha) – cena 130 zł/0,5 = 26 zł Pictor 400 SC (0,3 l/ha) – cena 302 zł/l = 90,6 zł	2 h
Zbiór jednofazowy – wczesnym latem kombajnem ciągnikowym	4 h
Razem $\Sigma = 540,4 \text{ zł}$	Razem $\Sigma = 19 \text{ h}$ $19 \text{ h} \times 6 \text{ l/h}^{**} = 114 \text{ l}$ $114 \text{ l} \times 2,31 \text{ zł/l}^{***} =$ $= 263,34 \text{ zł}$

Uprawa rzepaku* – własne maszyny i urządzenia; 6 l/h** – średnie zużycia paliwa przez ciągnik w ciągu godziny; 2,34 zł/l*** – koszt paliwa z produkcji własnej.

Źródło: opracowanie własne.

Tab.4. Inne koszty pośrednie

Nakład	Wartość
Opłaty rolne	100 zł
Amortyzacja maszyn i urządzeń	140 zł****
Razem $\Sigma = 240 \text{ zł}$	

140 zł**** – przeciętna utrata wartości środków eksploatowanych przez rolnika.

Źródło: opracowanie własne.

Wydatki łącznie na 1 ha: $\Sigma = 540,4 \text{ zł} + 263,34 \text{ zł} + 240 \text{ zł} = 1043,74 \text{ zł}$

Powierzchnia 2 ha: $1043,74 \text{ zł} \times 2 = 2087,48 \text{ zł}$

- c) Zysk z produkcji własnej biodiesla w porównaniu z zakupem paliwa na stacji (z uwzględnieniem wydatków związanych z uprawą rzepaku)
 $5153,03 \text{ zł} - 2087,48 \text{ zł} = 3065,55 \text{ zł}$

III) Okres zwrotu kosztów z produkcji własnej biodiesla (2ha) z uwzględnieniem wydatków na zakup maszyn do tłoczenia i estryfikacji

Na podstawie dokonanych analiz dotyczących granicy opłacalności produkcji biodiesla w gospodarstwie rolnym na Podlasiu można przyjąć, że wydatki związane z zakupem maszyn niezbędnych do uruchomienia produkcji (prasa do tłoczenia i estryfikator) przy 2 ha uprawie rzepaku zwracają się po 11,5 latach. Zatem:

a) Zakup maszyn:

$$19200 \text{ zł} + 16000 \text{ zł} = 35200 \text{ zł}$$

b) Zwrot inwestycji:

$$35200 \text{ zł} / 3065,55 \text{ zł} \approx 11,5 \text{ lat}$$

Zwrot poniesionych wydatków związanych z uprawą rzepaku znacznie by się skrócił (6 lat), przy zwiększeniu powierzchni uprawy do 4 ha. Roczny limit ustalony na 100 l/ha zapewniłby zagospodarowanie ok. 44 ha areálu użytków rolnych przy zbiorze 3 t rzepaku z hektara. Także dopłaty do produkowanego biodiesla w wysokości 0,95 zł do każdego litra (tak jak otrzymują rolnicy zakupujący ropę na stacjach benzynowych), gwarancja zbytu i pozwolenie na sprzedaż biodiesla na rynek w dużej mierze wpłyną na zwiększenie zysków, a co za tym idzie, do wzrostu produkcji biodiesla w innych gospodarstwach. Badania te pokazują, że wytwarzanie biopaliwa prostymi technologiami może być efektywne ekonomicznie.

4. Podsumowanie

Dokonana analiza produkcji biodiesla na własny użytek, z rzepaku ozimego w jednym z gospodarstw rolnych na Podlasiu, pozwala sformułować szereg wniosków.

Województwo Podlaskie jest regionem rolniczym, w którym uprawia się głównie zboża (w tym żyto, owies, kukurydzę i rzepak), ziemniaki, hoduje bydło, prowadzi agroturystykę. Szersze wprowadzenie do zmianowań rzepaku ozimego w tym regionie jest korzystne dla plonowania roślin zbożowych, gdyż oczyszcza je z chorób podsuszkowych i pozwala na głębsze zakorzenianie, przyczyniając się do lepszego znoszenia niedoboru opadów. Zastosowana agrotechnika uprawy w badanym gospodarstwie pozwala na pozyskiwanie plonu na poziomie 3 t/ha (gleby: IVa, IVb).

Obydwie ustawy z dnia 25 sierpnia 2006 r. o biokomponentach i biopaliwach ciekłych oraz o systemie monitorowania i kontrolowania jakości paliw wspierają ulgi, zwolnienia akcyzowe, promocję stosowania biodiesla na własny użytek (po uzyskaniu wpisu do rejestru rolników). Obowiązujące przepisy pozwalają zużyć we własnym gospodarstwie 100 l/ha powierzchni użytków rolnych będących w posiadaniu rolnika. Należy podkreślić, że zakazują one sprzedaży biodiesla na rynek oraz blokują produkcję tańszego paliwa na własny użytek gospodarstwom o małej powierzchni użytkowej (zbiór rzepaku z 1 ha kształtuje się na poziomie 3 t, z których można uzyskać 1105,8 l biodiesla. Paliwo te musi być wykorzystane przy powierzchni ok. 11 ha gospodarstwa).

Rozwój mechanizmów wspierających odzyskiwanie energii z niekonwencjonalnych źródeł jest istotnym czynnikiem mającym wpływ na kształtowanie ekorozwoju.

Umożliwienie produkcji biodiesla gospodarstwom o małej powierzchni użytkowej może zapewnić produkcja na bazie grup producenckich. Jednak w praktyce utrudniają to ministerialne przepisy (zgromadzenie wielu dokumentów, zgłoszenie produkcji do: sanepidu, straży pożarnej, KRUS-u i założenie składu podatkowego).

Proces produkcji estru metylowego może być efektywny ekonomicznie. Dokonując oceny rozpatrzeć należy: racjonalizację kosztów produkcji biodiesla, odzyskanie produktów ubocznych (tj. makuchy rzepakowe, gliceryna), działania obniżające straty związane z produkcją. Zysk z produkcji rzepaku ozimego oraz wyprodukowanego z niego biodiesla jest uzależniony od cen produktów rolnych i cen rynku zbytu. Koszt produkcji gotowego estru metylowego (2,31 zł/l) w badanym gospodarstwie jest niższy od wahających się cen paliwa ON na stacji benzynowej. Okres zwrotu kosztów z produkcji własnej biodiesla (z uwzględnieniem wydatków na uprawę rzepaku i zakupu maszyn do tłoczenia i estryfikacji) przy uprawie 2 ha wyniesie 11,5 roku, natomiast zwiększenie uprawy rzepaku zaledwie do 4 ha, przyczyniłby się do zwrotu inwestycji po 6 latach.

W rolnictwie dużą rolę odgrywa nie tylko potencjał ludzki, lecz także lokalny rozwój terenów wiejskich i właściwa polityka rolna władz samorządowych, umiejętności w podejmowaniu trafnych decyzji gospodarczych, dostęp do informacji związanych z załatwianiem niezbędnych formalności, pomoc finansowa ze strony państwa, doradztwo techniczne dotyczące dostępnych technologii, oświata rolnicza, właściwych dobór technologii i urządzeń do potrzeb gospodarstwa, przedsiębiorczość. To znajduje odzwierciedlenie w aktywizacji terenów wiejskich, zwiększaniu produkcji rolnej w celach energetycznych, tworzeniu nowych miejsc pracy w rozwoju drobnej przedsiębiorczości wiejskiej, we wzroście zainteresowania wytwarzaniem alternatywnych paliw silnikowych poprzez zmniejszanie szkodliwego działania emisji spalin do atmosfery.

Produkcja biopaliw może poprawić bezpieczeństwo energetyczne, nie tylko w poszczególnych regionach, ale i w całym kraju. Taki rodzaj produkcji pozwala rolnikowi uniezależnić się od dyktatu wzrostu cen paliw czy utrzymać stałe ceny swoich produktów. Biodiesel jako biopaliwo przyczynia się do zmniejszenia emisji szkodliwych substancji oraz obniża emisję gazów cieplarnianych do atmosfery. Ester metylowy może stać się powszechnie dostępny jako samodzielne paliwo lub biokomponent paliwowy na szerszą skalę w transporcie: samochodowym, wodnym i kolejowym.

Pomimo kryzysu i różnych zawirowań związanych ze stanowieniem prawa, pomimo braku jasnej perspektywy powyższe przesłanki przemawiają za produkcją biopaliw na własny użytek, który może stać się alternatywą dla wahających się cen ropy naftowej i przyczynić się do wzrostu bezpieczeństwa paliwowego. Niewątpliwie rozwój rynku biopaliw w dalszej perspektywie uzależniony będzie od zrównoważonej produkcji, poszukiwania innych roślin oleistych i wykorzystania niezagospodarowanych obszarów rolniczych.

Literatura

- Abnisa F., Wan Daud W.M.A., Husin W.N.W., Sahu J.N., *Utilization possibilities of palm shell as a source of biomass energy in Malaysia by producing bio-oil in pyrolysis process*, [W:] Biomass and Bioenergy, 35, 2011.
- Alcantara R., Amores J., Canoira L., Fidalgo E., Franco M.J., Navarro A., *Catalytic production of biodiesel from soy-bean oil, used frying oil and tallow*, [W:] Biomass & Bioenergy, nr 18, 2000.
- Antczak A., Antczak P., Witkowski T., *Analiza wpływu typu organizacji produkcji na sumaryczny czas wykonania zadań produkcyjnych*, [W:] Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Automatyka, nr 151, 2008.
- Barnwal B.K., Scharma M.P., *Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India*, [W:] Renewable and Sustainable Energy Reviews, nr 9, 2005.
- Białecka-Florjańczyk E., Stolarzewicz I., Kucharski D., *Mikrobiologiczne metody otrzymywania biodiesla*, [W:] Biotechnologia, nr 4(87), 2009.
- Biniek Z., *Elementy teorii systemów modelowania i symulacji*, [W:] Skrypt akademicki wyd. III Internetowe, Szczecin, Wydawnictwo INFOPLAN, 2002.
- Biodiesel Production and Quality*, April 2007.
- Bocheński C.I., *Biodiesel paliwo rolnicze*, Warszawa, Wydawnictwo SGGW, 2003.
- Boczar P., *Czynniki decydujące o konkurencyjności produkcji wybranych olejów roślinnych na świecie*, [W:] Zeszyty Naukowe SGGW. Problemy Rolnictwa Światowego, tom 12, nr 4, 2010.
- Boczar P., *Niektóre aspekty światowego rynku olejów roślinnych w latach 1961–2005*, [W:] Stowarzyszenie Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu. Roczniki Naukowe, nr 4, 2007.
- Börjesson P. I. I., *Energy Analysis Of Biomass Production and Transportation*, [W:] Biomass and Bioenergy, vol. 11, No. 4, 1996.
- Boszko J., *Struktura organizacyjna przedsiębiorstwa i drogi jej optymalizacji*, Warszawa, WNT, 1973.
- Brilman J., *Nowoczesne koncepcje i metody zarządzania*, Warszawa, PWE, 2002.
- Brzeziński M., *Organizacja sterowanie produkcją. Projektowanie systemów produkcyjnych i procesów sterowania produkcją*, Warszawa, Wydawnictwo Placet, 2002.
- Burczyk B., *Biomasa – surowiec do syntez chemicznych i produkcji paliw*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011.
- Caylak B., Vardar Sukan F., *Comparison of Different Production Processes for Bioethanol*, [W:] Turkish Journal of Chemistry, nr 22, 1998.

- Çetinkaya M., Karaosmanoğlu F., *Optimization of Base – Catalyzed Transesterification Reaction of Used Cooking Oil*, [W:] Energy & Fuels, nr 18, 2004.
- Chisti Y., *Biodiesel from microalgae*, [W:] Biotechnology Advances, vol. 25, 2007.
- Chochowski A., Krawiec F., *Zarządzanie w energetyce: koncepcje, zasoby, strategie, struktury, procesy i technologie energetyki odnawialnej*, Warszawa, Difin, 2008.
- Chum H. M., Overend R. P., *Biomass and Renewable Fuels*, [W:] Fuel Processing Technology, 71, 2001.
- Ciszak O., *Komputerowo wspomagane modelowanie i symulacja procesów produkcyjnych*, [W:] Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, nr 6, 2007.
- Ciszak O., *Modelling and Simulation of the final assembly using the Flexsim software*, in: 3rd International VIDA Conference, Poznań, 28–29.06.2007.
- Cleveland C.J., Constanza R., Hall C.A.S., Kaufmann R., *Energy and the US economy: a biophysical perspective*, [W:] Science, vol. 225, 1984.
- Cogan B., *Introductory chapter a few words about systems engineering*, [W:] Systems engineering – practice and theory, Rijeka, red. Cogan B. Intech, 2012.
- Cover story, *Microbiome mining*, [W:] Chemical & Engineering News, vol. 90, no. 49, december 3, 2012.
- Ćwikła G., Gołda G., *Modelowanie i symulacja jako narzędzie poprawy wydajności produkcji wyrobów wielkogabarytowych*, [W:] Komputerowo zintegrowane wytwarzanie, red. Knosala R., Warszawa, WNT, 2005.
- De B.K., Bhattacharyya D.K., Bandhu C., *Enzymatic synthesis of fatty alcohol esters by alcoholysis*, [W:] Journal of the American Oil Chemists' Society, nr 76, 1999.
- Demirbas A., *Biodiesel production via non-catalytic SCF method and biodiesel fuel characteristics*, [W:] Energy Conversion and Management, nr 27, 2006.
- Dietrich J., *System i konstrukcja*, Warszawa, WNT, 1985.
- Domański R., Pawlak N., *Wytyczne projektowania i stosowania szczupłych systemów produkcyjnych*, [W:] Logistyka, nr 1, 2007.
- Durlik I., *Inżynieria Zarządzania: strategia i projektowanie systemów produkcyjnych*, cz. I., Warszawa, Wydawnictwo Placet, 2007.
- Dziubiński F., Lenik Z., *Wprowadzenie do techniki*, Lublin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 2007.
- Eggert H., Greaver M., *Promoting Second Generation Biofuels: Does the First Generation Pave the Road?*, [W:] Energies, nr 7, 2014.
- Eisentraut A., *Sustainable Production of Second – Generation Biofuels – Potential and perspectives in major economies and developing countries*, International Energy Agency, 2010.
- Elmqvist H., Mattsson S.E., Olsson H., *New Methods for Hardware-in-the-Loop Simulation of Stiff Models*, 2nd International Modelica Conference, 2002.
- Feld M., *Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn*, Warszawa, WNT, 2009, s. 17–21.

- Fontaras G., Skoulou V., Zanakis G., Zabaniotou A., Samaras Z., *Integrated environmental assessment of energy crops for biofuel and energy production in Greece*, [W:] Renewable Energy, nr 43, 2012.
- Garcia A., Poznyak A., Chaires I., *Differential Neural Networks Observers: development, stability analysis and implementation*, [W:] Systems, Structure and Control, Vienna, red. Husek P. In-Teh, 2008.
- Gerpen J.V., Knothe G., *Biodiesel Production. Basics of the Transesterification Reaction*, [W:] The Biodiesel Handbook, AOCS Press, Champaign 2005.
- Gołabek A., *Metodyka badań i oceny niezawodności maszyn w ujęciu systemowym*, [W:] Materiały XXI Zimowej Szkoły Niezawodności. Kształtowanie i obliczanie niezawodności obiektów technicznych w procesie ich projektowania, Szczyrk, 1993.
- Grzywa E., Molenda J., *Technologia podstawowych syntez organicznych*, Warszawa, WNT, t.1, 2000.
- Hall C.A.S., Lambert J.G. Balogh S.B., *EROI of different fuels and the implication for society*, [W:] Energy Policy, vol. 64, 2014.
- Hammer M., Champy J., *Reengineering w przedsiębiorstwie*, Warszawa, Neumann Management Institute, 1996.
- Igliński B., Buczkowski R., Cichosz M., *Technologie bioenergetyczne*, Toruń, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, 2009.
- Indywidualne gospodarstwo rolne (mała skala produkcji na potrzeby własne) – informacja prywatna; Perrier T., *Informacja prywatna z przedsiębiorstwa rolnego*, „Barycz”, 2014.
- Instytut Ochrony Roślin, *Integrowana produkcja rzepaku ozimego i jarego*, Poznań, 2008.
- Jackowicz R., Lis S., *Podstawy projektowania struktur przedsiębiorstw przemysłowych*, Warszawa, PWN, 1987.
- Jacobson K., Gopinath R., Meher L.Ch., Dalai A.K., *Solid acid catalyzed biodiesel production from waste cooking oil*, [W:] Applied Catalysis B: Environmental, vol. 85, 2008.
- Jaros M., Pabis S. *Inżynieria systemów*, Wrszawa, SGGW, 2007.
- Jasińska Z., Kolečki A., *Szczegółowa uprawa roślin 2*, Wrocław, Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 1999.
- Jasiulewicz M., *Potencjał biomasy w Polsce*, Koszalin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2010.
- Jastrzębska G., *Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne*, Warszawa, WNT, 2007.
- Jodłowski W., Michłowicz E., *Problem czasu w strukturach systemów produkcyjnych*, [W:] Automatyka, tom 13, z. 2, 2009.
- Jokiniemi T., Ahokas J., *A review of production and use of first generation biodiesel in agriculture*, [W:] Agronomy Research, nr 11, 2013.
- Juliszewski T., Zajac T., *Biopaliwa rzepakowe*, Poznań, PWRiL, 2007.
- Karmee S.K., Chadha A., *Preparation of biodiesel from crude oil of Pongamia pinnata*, [W:] Bioresour Technology, nr 96, 2005.

- Kawecka-Endler A., *Organizacja technologicznego przygotowania produkcji-prac rozwojowych*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2004.
- Klimiuk E., Pawłowska M., Pokój T., *Biopaliwa – technologie dla zrównoważonego rozwoju*, Warszawa, PWN, 2012.
- Kornacki A., Wesołowska-Janczarek M., *O weryfikowaniu poprawności matematycznych modeli procesów w oparciu o dane empiryczne*, [W:] *Problemy inżynierii rolniczej*, r. 16, 3/2008.
- Korzyński M., *Podstawy technologii maszyn*, Rzeszów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2002.
- Kośmicki Z., Kęska W., Feder S., *Relacja: badania empiryczne-symulacyjne w procesie przygotowania produkcji maszyn*, [W:] *Journal of research and applications in agricultural engineering*, vol. 48 (4), 2003.
- Kotowski W., *Przetwarzanie biomasy do metanolu i paliw silnikowych*, [W:] *Przemysł chemiczny*, nr 82/8–9, 2003.
- Krawiec F., *Odnawialne źródła energii w świetle globalnego kryzysu energetycznego*, Warszawa, Difin, 2010.
- Kubiński W., *Inżynieria i technologie produkcji*, Kraków, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, 2008.
- Kulkarni M.G., Dalai A.K., *Waste Cooking Oil – An Economical Source for Biodiesel: A Review*, [W:] *Industrial & Engineering Chemistry Research*, nr 45, 2006.
- Kupczyk A., Ruciński D., *Wykorzystanie biopaliw transportowych w Polsce na tle UE. Narodowy Cel Wskaźnikowy – stan obecny i perspektywy*, [W:] *Energetyka*, nr 12, 2008.
- Kustroń K., *Eksploracja złożonych systemów technicznych*, [W:] *Systems*, vol.9, Special Issue 2/1, 2004.
- Łaba S., Waćko P., *Modelowanie i symulacja procesów produkcyjnych*, [W:] *Przemysł Spożywczy*, nr 4, tom 63, 2009.
- Lalak J., Kasprzycka A., Murat A., Paprota E.M., Tys T., *Obróbka wstępna biomasy bogatej w lignocelulozę w celu zwiększenia wydajności fermentacji metanowej*, [W:] *Acta Agrophysica*, nr 21, 2014.
- Langman J., *Wybrane zagadnienia diagnostyki technicznej w inżynierii rolniczej*, Kraków, Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, 2012.
- Leszek W., *Przewidywanie wyników badań empirycznych*, [W:] *Problemy eksploatacji*, nr 4(47), 2002.
- Lewicki P., *Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego*, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2005.
- Li Y., Horsman M., Wu N., Lan CQ., Dubois-Calero N., *Biofuels from microalgae*, [W:] *Biotechnology progress*, nr 24, 2008.
- Ligus M., *Efektywność inwestycji w odnawialne źródła energii*, Warszawa, Wydawnictwa Fachowe, 2010.
- Linko Y-Y., Lämsä M., Wu X., Uosukainen E., Seppälä J., Linko P., *Biodegradable products by lipase biocatalysis*, [W:] *Journal of Biotechnology*, nr 66, 1998.

- Lis S., *Organizacja i ekonomika procesów produkcyjnych w przemyśle maszynowym*, Warszawa, PWN, 1984.
- Lis. A., Lis. M., *Rachunek prawdopodobieństwa w inżynierii jakości*, [W:] Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Górnictwo, z. 255, 2002.
- Liu Dawei., Liu Dapeng, Zeng J.R., Angelidaki I., *Hydrogen and methane production from household solid waste in the two-stage fermentation process*, [W:] Water Research, vol. 40, issue 11, 2006.
- Lorencowicz E., *Poradnik użytkownika techniki rolniczej w tabelach*, Bydgoszcz, Agencja Promocji Rolnictwa i Agrobiznesu, 2012.
- Lubniewski Z., Gnadecka A., Mikołajczak K., Lewandowicz G., *Zagospodarowanie odpadowych tłuszczów zwierzęcych metodami enzymatycznymi*, [W:] Nauka Przyroda Technologie, z.4 tom 3, 2009.
- Łunarski J. *O problemach ewolucji systemów technicznych*, [W:] Technologia i Automatyzacja Montażu, nr 1, 2011.
- Matuszak Z., *Wybrane zagadnienia dotyczące opisu systemów technicznych*, [W:] Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, nr 5 (77), 2005.
- Mazurczak J., Gania I., *Miary warunków organizowania systemów produkcyjnych*, [W:] Logistyka, nr 2, 2009.
- Mazurczak J., *Projektowanie struktur systemów produkcyjnych*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2002.
- Menes E., Słoński D., *Energochłonność i emisja dwutlenku węgla generowana przez transport krajów tworzących UE*, [W:] Transport samochodowy, nr 2, 2010.
- Merkisz J., Pielecha I., *Alternatywne napędy pojazdów*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2006.
- Michłowicz E., *Logistyka a teoria systemów*, [W:] Automatyka, tom 13, z. 2, 2009.
- Milkiewicz F., *Sterowanie systemami produkcyjnymi*, Gdańsk, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2004.
- Mitchell C.P., Bridgwater A.V., Stevens D.J., Toft A.J., Watters M.P., *Technoeconomic assessment of biomass to energy*, [W:] Biomass and Bioenergy, vol. 9, no. 1–5, 1995.
- Morrison D.F., *Wielowymiarowa analiza statystyczna*, Warszawa, PWN, 1990.
- Mreła A., *Jakość danych empirycznych w badaniach naukowych*, [W:] Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 51, 2004.
- Mrozek Z., *Modelowanie fizyczne*, [W:] Pomiary Automatyka Robotyka, nr 4, 2003.
- Myszewski J.M., *Controllability and operability in manufacturing process*, [W:] Innovative and intelligent manufacturing systems, Poznań, red. Fertsch M., 2010.
- Naik S.N., Goud V.V., Rout P.K., Dalai A.K., *Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review*, [W:] Renewable and Sustainable Energy Reviews, nr 14, 2010.
- Nelson L.A., Foglia T.A., Marmer W.N., *Lipase-catalyzed production of biodiesel*, [W:] Journal of the American Oil Chemists' Society, nr 73, 1996.
- News of the week, *Enzymes play nicely together*, [W:] Chemical & Engineering News, vol. 90, no. 49, December 3, 2012.

- Nilsson D., *Energy, Exergy and Emergy analysis of using straw as fuel in district heating plant*, [W:] Biomass and Bioenergy, vol. 13, no. 1–2, 1997.
- Niziński S., *Eksploracja obiektów technicznych*, Radom, ITE, 2002.
- Nowakowski T., *Niezawodność systemów logistycznych*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011.
- Odum H.T., *Environment, power, and society for the twenty-first century. The hierarchy of energy*, New York, Columbia University Press, 2007.
- Oniszczyk W., *Metody modelowania*, Białystok, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej.
- Orynych O. A., *Perspektywy rozwoju produkcji biopaliw ciekłych w indywidualnych gospodarstwach rolnych*, [W:] Zarządzanie i Finanse, nr 10/2/1, 2012.
- Orynych O. A., *Produkcja biodiesla na własny użytek w gospodarstwie rolnym szansą na przetrwanie w kryzysie*, [W:] Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, nr 231, 2012.
- Orynych O. A., *Produkcja biopaliw ciekłych, jako źródła energii dla transportu*, [W:] Energetyka i ekologia, nr 8, 2012.
- Orynych O. A., Wasiak A., *Effects of tillage technology on energetic efficiency of rape-seed plantation for biofuel production*, [W:] Applied Computer Science, vol. 10, no. 2, 2014.
- Ostwald M., *Podstawy optymalizacji konstrukcji*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, s. 99; Bai J., *Determining the number of factors in approximate factor models*, [W:] Econometrica, vol. 70, no. 1.
- Painuly J. P., Rao H., Parikh J., *A rural energy – agriculture interaction model applied to Karnataka state*, [W:] Energy, vol. 20, no. 3, 1995.
- Pająk E., *Zarządzanie produkcją. Produkt, technologia, organizacja*, Warszawa, PWN, 2006.
- Papworth I., Donnelly B., Skinder I., *UIC study on Railways and Biofuels*, Paris, UIC biofuels workshop, 2007.
- Pińkowska H., *Techniczne aspekty produkcji biodiesla – nowe kierunki badań*, [W:] Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu. Technologia 13, nr 30, 2008.
- Podkówka W. (red.), *Biopaliwo, gliceryna, pasza z rzepaku: praca zbiorowa*, Bydgoszcz, Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, 2004.
- Raslavicius L., Bazaras Z., *Ecological assessment and economic feasibility to utilize first generation biofuels in cogeneration output cycle*, [W:] Energy, nr 35, 2010.
- Roszak M., *Chosen aspects of evaluation of productive processes on the example of productive chains of gear*, [W:] Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, vol. 14 (1–2), 2006.
- Rudnicki Z., *Zmienne losowe i wprowadzenie do modelowania probabilistycznego*.
- Rusinowski H., Szega Marcin., Stanek W., *Ocena energetyczna eksploatacji bloku energetycznego z wykorzystaniem modelowania empirycznego*, [W:] Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Konferencje, tom 2, z. 25, 2007.
- Shay E.G., *Diesel fuel from vegetable oils: Status and opportunities*, [W:] Biomass and Bioenergy, nr 4, 1993.

- Shimada Y., Sugihara A., Minamigawa Y., Higashiyama K., Akimoto K., Fujikawa S., Komemushi S., Tominaga Y., *Enzymatic enrichment of arachidonic acid from Mortierella single-cell oil*, [W:] Journal of the American Oil Chemists' Society, nr 75, 1998.
- Sikora M., *Przed wszystkim agrotechnika*, [W:] Wieś, nr 2, 2014.
- Singh S.P., Singh D., *Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review*, [W:] Renewable and Sustainable Energy Reviews, nr 14, 2010.
- Sitnik L.J., *Ekopaliwa silnikowe*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2004.
- Sobiś A., *Projektowanie systemów produkcyjnych (jednego z elementów systemów logistycznych)*, [W:] Systemy logistyczne, nr 4, 2008.
- Stamirowski J., *Przegląd możliwości zastosowania notacji graficznych w modelowaniu systemów technicznych*, [W:] Technologia i automatyzacja montażu, nr 1, 2005.
- Świrski K., Domański P., Lewandowski J., *Modele empiryczne w zastosowaniach instalacji energetycznych*, [W:] Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Konferencje, tom 4, z.22, 2002.
- Tarnowski W., *Modelowanie systemów technicznych*. Skrypt do wykładu dla Studium Doktoranckiego, Koszalin, 2003.
- Tokay B.A., *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Sixth Completely Revised Edition*, Weinheim, Sixth Completely Revised Edition Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, vol. 5, 2003.
- Tomaszewski Z., *Wprowadzenie do techniki*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2002.
- Tys J., Piekarski W., Jackowska I., Kaczor A., Zajac G., Starobrat P., *Technologiczne i ekonomiczne uwarunkowania produkcji biopaliwa z rzepaku*, Lublin, Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, 2003.
- Tyson K.S., Bozell J., Wallace R., Petersen E., Moens L., *Biomass Oil Analysis: Research Needs and Recommendations. Technical Report*, Colorado, NREL National Renewable Energy Laboratory, 2004.
- Tytko R., *Odnawialne źródła energii*, Warszawa, OWG, 2009.
- UNESCO, *Modelling Methods for Evaluating Alternatives*, [W:] Water resources systems planning and management, 2005.
- UNIDO, *Biodiesel production promotion countrywide feasibility study for a potential croatian biodiesel industry. Final Technical Report*, Vienna, United Nations Industrial Development Organization, 2006.
- Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o biokomponentach i biopaliwach ciekłych, Dz.U. 2006, nr 169, poz. 1199 z późn. zm.
- Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o systemie monitorowania i kontrolowania jakości paliw, Dz.U. 2006, nr 169, poz. 1200.
- Zawadzka L., Oliński K.E., *Computational intelligence methods on production management*, [W:] Innovative and intelligent manufacturing systems, Poznań, red. Fertsch M., 2010.

- Zdanowicz R., *Modelowanie i symulacja procesów wytwarzania*, Gliwice, WPS, 2007.
- Zeigler B.P., *Teoria modelowania i symulacji*, Warszawa, PWN, 1984.
- Zhang Y., Dubé MA., McLean DD., Kates M., *Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensitivity analysis*, [W:] Bioresour Technology, nr 90, 2003.
- Zheng Ji-lu., *Bio-oil from fast pyrolysis of rice husk: Yields and related properties and improvement of the pyrolysis system*, [W:] Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, nr 80(1), 2007.
- Zheng S., Kates M., Dubé M.A., McLean D.D., *Acid-catalyzed production of biodiesel from waste frying oil*, [W:] Biomass & Bioenergy, nr 30, 2006.
- Zieleniewicz W., *Uproszczenia w uprawie*, [W:] Farmer, nr 16, 2008.
- Довгань Ю.В., *Стан та перспективи розвитку ринку продукції підприємств олійно-жирового підкомплексу АПК*, [W:] Збірник наукових праць Таврійського Державного Агротехнологічного Університету (Економічні науки), nr 2 (18) tom 2, 2012.

Wykaz tabel

Tab. 1.	Zużycie finalne paliw ciekłych w transporcie w UE w 2007 r., [ktoe]	26
Tab. 2.	Produkcja i zużycie olejów napędowych w Polsce	27
Tab. 3.	Produkcja oleju napędowego w mln t na świecie.....	27
Tab. 4.	Zapotrzebowanie na energię finalną w podziale na sektory gospodarki [Mtoe].....	28
Tab. 5.	Skala potrzeb na energię finalną w podziale na nośniki [Mtoe].....	29
Tab. 6.	Skala potrzeb na energię finalną brutto z OZE w podziale na rodzaje energii [ktoe].....	29
Tab. 7.	Emisja CO ₂ z sektora transportu krajów UE w latach 1990–2007 r. [mln ton].....	31
Tab. 8.	Samochody z napędem benzynowym w Polsce*	32
Tab. 9.	Samochody z silnikami na olej napędowy w Polsce*	32
Tab. 10.	Źródła tłuszczów na świecie	34
Tab. 11.	Źródła biopaliw ciekłych i ich przeznaczenie	35
Tab. 12.	Stawki udziału biokomponentów w rynku paliw transportowych	37
Tab. 13.	Skala zapotrzebowania na olej rzepakowy zużywany na cele spożywcze w okresie 2005–2013	38
Tab. 14.	Skala zapotrzebowania na olej rzepakowy zużywany na cele energetyczne w okresie 2005–2013*	39
Tab. 15.	Skala powierzchni uprawy, plonów i zbiorów rzepaku w okresie 2005–2013.....	39
Tab. 16.	Krajowa prognoza zapotrzebowania na rzepak do produkcji biodiesla w latach 2010–2020	42
Tab. 17.	Bilans biodiesla w Mg w Polsce	42
Tab. 18.	Technologie olejarskie w zależności od skali produkcji	49
Tab. 19.	Klasyfikacja instalacji do produkcji biopaliwa rzepakowego	49
Tab. 20.	Właściwości przykładowych gatunków biodiesla.....	50
Tab. 21.	Przykładowe metody transestryfikacji	53
Tab. 22.	Przykłady reakcji enzymatycznych transestryfikacji z użyciem różnych alkoholi i lipazy.....	54
Tab. 23.	Biopaliwa drugiej generacji z surowców lignocelulozowych	59
Tab. 24.	Wydajność i zawartość oleju w wybranych roślinach oleistych i algach.....	61
Tab. 25.	Hierarchia wiedzy o systemie	70

Tab. 26.	Wpływ skali produkcji na wybrane czynniki związane z procesem technologicznym	89
Tab. 27.	Niektóre programy do modelowania i symulacji procesów	100
Tab. 28.	Przebyte drogi na polu podczas orki 1 ha pługiem zagonowym dwuskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów	124
Tab. 29.	Przebyte drogi na polu podczas orki 1 ha pługiem zagonowym trójskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów	124
Tab. 30.	Przebyte drogi na polu podczas orki 1 ha pługiem zagonowym czteroskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów	124
Tab. 31.	Przebyte drogi na polu podczas orki 1 ha pługiem zagonowym pięcioskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów	125
Tab. 32.	Przebyte drogi na polu podczas orki 2 ha pługiem zagonowym dwuskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów	125
Tab. 33.	Przebyte drogi na polu podczas orki 2 ha pługiem zagonowym trójskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów	125
Tab. 34.	Przebyte drogi na polu podczas orki 2 ha pługiem zagonowym czteroskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów	126
Tab. 35.	Przebyte drogi na polu podczas orki 2 ha pługiem zagonowym pięcioskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów	126
Tab. 36.	Przebyte drogi na polu podczas orki 4 ha pługiem zagonowym dwuskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów	126
Tab. 37.	Przebyte drogi na polu podczas orki 4 ha pługiem zagonowym trójskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów	127
Tab. 38.	Przebyte drogi na polu podczas orki 4 ha pługiem zagonowym czteroskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów	127
Tab. 39.	Przebyte drogi na polu podczas orki 4 ha pługiem zagonowym pięcioskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów	127
Tab. 40.	Przebyte drogi na polu podczas orki 8 ha pługiem zagonowym dwuskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów	128
Tab. 41.	Przebyte drogi na polu podczas orki 8 ha pługiem zagonowym trójskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów	128
Tab. 42.	Przebyte drogi na polu podczas orki 8 ha pługiem zagonowym czteroskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów	128
Tab. 43.	Przebyte drogi na polu podczas orki 8 ha pługiem zagonowym pięcioskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów	129
Tab. 44.	Przebyte drogi na polu podczas orki 10 ha pługiem zagonowym dwuskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów	129
Tab. 45.	Przebyte drogi na polu podczas orki 10 ha pługiem zagonowym trójskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów	129
Tab. 46.	Przebyte drogi na polu podczas orki 10 ha pługiem zagonowym czteroskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów	130

Tab. 47.	Przebyte drogi na polu podczas orki 10 ha plugiem zagonowym pięcioskibowym o różnych szerokościach roboczych korpusów	130
Tab. 48.	Przebyte drogi na polu podczas talerzowania 1 ha broną talerzową dwuwalcową o różnej liczbie talerzy w sekcji	130
Tab. 49.	Przebyte drogi na polu podczas talerzowania 1 ha broną talerzową czterowalcową o różnej liczbie talerzy w sekcji	131
Tab. 50.	Przebyte drogi na polu podczas talerzowania 2 ha broną talerzową dwuwalcową o różnej liczbie talerzy w sekcji	131
Tab. 51.	Przebyte drogi na polu podczas talerzowania 2 ha broną talerzową czterowalcową o różnej liczbie talerzy w sekcji	131
Tab. 52.	Przebyte drogi na polu podczas talerzowania 4 ha broną talerzową dwuwalcową o różnej liczbie talerzy w sekcji	132
Tab. 53.	Przebyte drogi na polu podczas talerzowania 4 ha broną talerzową czterowalcową o różnej liczbie talerzy w sekcji	132
Tab. 54.	Przebyte drogi na polu podczas talerzowania 8 ha broną talerzową dwuwalcową o różnej liczbie talerzy w sekcji	132
Tab. 55.	Przebyte drogi na polu podczas talerzowania 8 ha broną talerzową czterowalcową o różnej liczbie talerzy w sekcji	133
Tab. 56.	Przebyte drogi na polu podczas talerzowania 10 ha broną talerzową dwuwalcową o różnej liczbie talerzy w sekcji	133
Tab. 57.	Przebyte drogi na polu podczas talerzowania 10 ha broną talerzową czterowalcową o różnej liczbie talerzy w sekcji	133
Tab. 58.	Przebyte drogi na polu podczas bronowania 1 ha broną polową o różnych szerokościach roboczych	134
Tab. 59.	Przebyte drogi na polu podczas bronowania 2 ha broną polową o różnych szerokościach roboczych	134
Tab. 60.	Przebyte drogi na polu podczas bronowania 4 ha broną polową o różnych szerokościach roboczych	134
Tab. 61.	Przebyte drogi na polu podczas bronowania 8 ha broną polową o różnych szerokościach roboczych	135
Tab. 62.	Przebyte drogi na polu podczas bronowania 10 ha broną polową o różnych szerokościach roboczych	135
Tab. 63.	Przebyte drogi na polu podczas rozrzucania obornika na 1 ha rozrzutnikami o różnych szerokościach roboczych	135
Tab. 64.	Przebyte drogi na polu podczas rozrzucania obornika na 2 ha rozrzutnikami o różnych szerokościach roboczych	136
Tab. 65.	Przebyte drogi na polu podczas rozrzucania obornika na 4 ha rozrzutnikami o różnych szerokościach roboczych	136
Tab. 66.	Przebyte drogi na polu podczas rozrzucania obornika na 8 ha rozrzutnikami o różnych szerokościach roboczych	136
Tab. 67.	Przebyte drogi na polu podczas rozrzucania obornika na 10 ha rozrzutnikami o różnych szerokościach roboczych	137

Tab. 68.	Przebyte drogi na polu podczas obsiewania 1 ha siewnikami o różnych szerokościach roboczych	137
Tab. 69.	Przebyte drogi na polu podczas obsiewania 2 ha siewnikami o różnych szerokościach roboczych	137
Tab. 70.	Przebyte drogi na polu podczas obsiewania 4 ha siewnikami o różnych szerokościach roboczych	138
Tab. 71.	Przebyte drogi na polu podczas obsiewania 8 ha siewnikami o różnych szerokościach roboczych	138
Tab. 72.	Przebyte drogi na polu podczas obsiewania 10 ha siewnikami o różnych szerokościach roboczych	138
Tab. 73.	Przebyte drogi na polu podczas koszenia 1 ha kombajnami o różnych szerokościach roboczych przyrządów żniwnych	139
Tab. 74.	Przebyte drogi na polu podczas koszenia 2 ha kombajnami o różnych szerokościach roboczych przyrządów żniwnych	139
Tab. 75.	Przebyte drogi na polu podczas koszenia 4 ha kombajnami o różnych szerokościach roboczych przyrządów żniwnych	139
Tab. 76.	Przebyte drogi na polu podczas koszenia 8 ha kombajnami o różnych szerokościach roboczych przyrządów żniwnych	140
Tab. 77.	Przebyte drogi na polu podczas koszenia 10 ha kombajnami o różnych szerokościach roboczych przyrządów żniwnych	140
Tab. 78.	Dane techniczne agregatu uprawowego <i>Compil</i>	151
Tab. 79.	Dane techniczne zestawu <i>Strip-Till</i>	151
Tab. 80.	Zestawienie zabiegów agrotechnicznych przy uprawie rzepaku ozimego różnymi technologiami	153
Tab. 81.	Pracochłonność i zużycie paliwa na uprawę 1 [ha] rzepaku ozimego różnymi technologiami	153
Tab. 82.	Zużycie energii dla różnych wariantów i metod technologicznych stosowanych na plantacjach rzepaku	158
Tab. 83.	Ilość energii uzyskana z biopaliw przy różnych wielkościach plantacji	161
Tab. 84.	Efektywność energetyczna $\mathcal{E}$ dla kilku wariantów i różnych metod produkcji	162
Tab. 85.	Stosunek energii uzyskanej z plantacji do energii zużytej w operacjach agrotechnicznych z uwzględnieniem udziału energii wbudowanej, E_{emb} , zużywanej przy wykorzystaniu środków produkcji dla trzech metod uprawy	163
Tab. 86.	Maksymalna ilość energii, która może być użyta do transportu przy różnych wariantach uprawy	164
Tab. 87.	Odległość jaka może być przebyta poza polem w stosunku do całkowitego zużycia energii w operacjach agrotechnicznych	166
Tab. 88.	Ilość plonu uzyskanego z plantacji i wynikający z niej popyt na środki transportu	169

Tab. 89.	Zestawienie ilości uzyskanej energii z biopaliw i energii zużytej dla różnych wariantów i metod technologicznych	170
Tab. 90.	Całkowita odległość, która może być przejechana poza polem przy założeniu, że energia zużywana w transporcie wynosi 10% zysku energetycznego	171
Tab. 91.	Całkowita odległość, która może oddzielać pola i obiekty przemysłowe przy założeniu, że energia zużywana w transporcie wynosi 10% zysku energetycznego (powyżej wkładu energii zużytej na operacje agrotechniczne)	171
Tab. 92.	Wartości parametrów uwzględnianych w obliczeniach	175
Tab. 93.	Wartości D_{out} [km] dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 4$ m	176
Tab. 94.	Wartości D_{out} [km] dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 0,5$ m	178
Tab. 95.	Energia E_{out} [MJ] zużyta dla przejazdów na zewnątrz plantacji dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 4$ m	180
Tab. 96.	Energia E_{out} [MJ] zużyta dla przejazdów na zewnątrz plantacji dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 0,5$ m	181
Tab. 97.	Suma energii $E_{out} + E_{agr}$ [MJ] zużytych do pojedynczej operacji agrotechnicznej na zewnątrz i wewnątrz pól dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 4$ m	181
Tab. 98.	Suma energii $E_{out} + E_{agr}$ [MJ] zużytych do pojedynczej operacji agrotechnicznej na zewnątrz i wewnątrz pól dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 0,5$ m	182
Tab. 99.	Stosunek energii zawartej w biopaliwie, E_{bio} , do sumy energii, $E_{out} + E_{agr}$, zużytych do pojedynczej operacji agrotechnicznej na zewnątrz i wewnątrz pól dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 4$ m i wydajność z pola wynosi 380 l/ha	182
Tab. 100.	Stosunek energii zawartej w biopaliwie, E_{bio} , do sumy energii, $E_{out} + E_{agr}$, zużytych do pojedynczej operacji agrotechnicznej na zewnątrz i wewnątrz pól dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c ,	

dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 0,5$ m i wydajność z pola wynosi 380 l/ha	182
Tab. 101. Stosunek energii zawartej w biopaliwie, E_{bio} , do sumy energii, $E_{out} + E_{agr}$, zużytych do pojedynczej operacji agrotechnicznej na zewnątrz i wewnątrz pól dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 4$ m i wydajność z pola wynosi 1500 l/ha	183
Tab. 102. Stosunek energii zawartej w biopaliwie, E_{bio} , do sumy energii, $E_{out} + E_{agr}$, zużytych do pojedynczej operacji agrotechnicznej na zewnątrz i wewnątrz pól dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 0,5$ m i wydajność z pola wynosi 1500 l/ha	184
Tab. 103. Porównanie stosunku energii zawartej w biopaliwie, E_{bio} , do sumy energii, $E_{out} + E_{agr}$, zużytych dla operacji agrotechnicznych i przejazdów na zewnątrz i wewnątrz pól w funkcji liczby operacji wykonywanych dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 4$ m i wydajność z pola wynosi 380 l/ha i 1500 l/ha	184
Tab. 104. Porównanie stosunku energii zawartej w biopaliwie, E_{bio} , do sumy energii, $E_{out} + E_{agr}$, zużytych dla operacji agrotechnicznych i przejazdów na zewnątrz i wewnątrz pól w funkcji liczby operacji wykonywanych dla układu 5 identycznych pól każde o powierzchni, A , oddzielonych od siebie na odległość, l , i od bazy na odległość, c , dla przypadku, gdy szerokość pasa obróbki $d = 0,5$ m i wydajność z pola wynosi 380 l/ha i 1500 l/ha.....	185
Załącznik	
Tab. 1. Parametry techniczne prasy.....	193
Tab. 2. Parametry techniczne estrifikatora	196
Tab. 3. Przygotowanie ziemi pod uprawę rzepaku.....	200
Tab.4. Inne koszty pośrednie.....	201

Wykaz rycin

Rys. 1.	Czynniki kształtujące zapotrzebowanie na biopaliwa.....	30
Rys. 2.	Energia z surowców roślinnych	33
Rys. 3.	Perspektywy udziału biokomponentów w rynku paliw transportowych do 2020 r.	38
Rys. 4.	Dynamika powierzchni zasiewów rzepaku i rzepiku ozimego w Polsce	40
Rys. 5.	Dynamika plonów rzepaku i rzepiku ozimego w Polsce.....	40
Rys. 6.	Dynamika zbiorów rzepaku i rzepiku ozimego w Polsce	41
Rys. 7.	Przykładowe kombinacje zagospodarowania półproduktów i surowców odpadowych	43
Rys. 8.	Sposoby zagospodarowania odpadów.....	44
Rys. 9.	Porównanie wartości opałowych niektórych typów odpadów biomasy	45
Rys. 10.	Podział biopaliw w zależności od rodzaju surowca i technologii wytwarzania	46
Rys. 11.	Przykładowy system produkcyjny wytwarzania biodiesla.....	56
Rys. 12.	Schemat reakcji transestryfikacji	57
Rys. 13.	Schemat biorafinerii lignocelulozowej.....	59
Rys. 14.	Przykładowe rodzaje alg	61
Rys. 15.	Schemat hodowli glonów.....	62
Rys. 16.	Schemat zgazowania biomasy.....	64
Rys. 17.	Podział systemów ze względu na rodzaj obiektów i związków między obiektami.....	68
Rys. 18.	Schemat funkcjonowania systemu działania.....	69
Rys. 19.	Związki pomiędzy etapami opisu hierarchii systemu	70
Rys. 20.	Właściwości środka technicznego.....	72
Rys. 21.	Podstawowe rozróżnianie środków technicznych pod względem działania ...	72
Rys. 22.	Model blokowy megaukładu technicznego	73
Rys. 23.	Uogólniony model systemu produkcyjnego.....	75
Rys. 24.	Podstawowe struktury stosowane w systemach produkcyjnych	79
Rys. 25.	Podejście metodyczne do budowy algorytmów projektowania struktury organizacyjnej przedsiębiorstwa	80
Rys. 26.	Proces produkcyjny wyrobu w różnych jednostkach produkcyjnych W ₁ , W ₂ – wyroby, JP ₁ , JP ₂ , JP ₃ – jednostki produkcyjne, O – stanowiska pracy, -> cykl procesu	84

Rys. 27.	Etapy planowania produkcji.....	85
Rys. 28.	Schemat procesu wytwórczego	86
Rys. 29.	Uogólniony proces technologiczny	88
Rys. 30.	Systematyka modeli	93
Rys. 31.	Specyfikacja modeli	94
Rys. 32.	Etapy modelowania.....	97
Rys. 33.	Przebieg modelowania i symulacji.....	98
Rys. 34.	Schemat systemu masowej obsługi (SMO).....	110
Rys. 35.	Relacje w systemie produkcyjnym biopaliw.....	116
Rys. 36.	Wkłady energii niezbędne do prowadzenia kolejnych procesów w systemie produkcyjnym biopaliw.....	117
Rys. 37.	Przykładowe warianty powierzchni pól 1 ha w [m].....	121
Rys. 38.	Przykładowe warianty powierzchni pól 2 ha w [m].....	122
Rys. 39.	Przykładowe warianty powierzchni pól 4 ha w [m].....	122
Rys. 40.	Przykładowe warianty powierzchni pól 8 ha w [m].....	123
Rys. 41.	Przykładowe warianty powierzchni pól 10 ha w [m].....	123
Rys. 42.	Zużycie paliwa na hektar w tradycyjnej uprawie plantacji z zastosowaniem różnych przedplonów	156
Rys. 43.	Zużycie paliwa na hektar w uproszczonej uprawie plantacji z zastosowaniem różnych przedplonów	156
Rys. 44.	Zużycie paliwa na hektar metodą siewu bezpośredniego z zastosowaniem różnych przedplonów	157
Rys. 45.	Zależność zużycia energii od powierzchni pola dla różnych wariantów metodą tradycyjną	159
Rys. 46.	Zależność zużycia energii od powierzchni pola dla różnych wariantów metodą UTU.....	159
Rys. 47.	Zależność zużycia energii od powierzchni pola dla różnych wariantów metodą siewu bezpośredniego.....	160
Rys. 48.	Maksymalna ilość energii, E_{tr} , przy różnych wariantach uprawy, metodą tradycyjną	165
Rys. 49.	Maksymalna ilość energii, E_{tr} , przy różnych wariantach uprawy, metodą UTU.....	165
Rys. 50.	Maksymalna ilość energii, E_{tr} , przy różnych wariantach uprawy, metodą siewu bezpośredniego.....	166
Rys. 51.	Odległość poza polem, D_{tr} , w stosunku do całkowitego zużycia energii w operacjach agrotechnicznych przy różnych wariantach uprawy, metodą tradycyjną	167
Rys. 52.	Odległość poza polem, D_{tr} , w stosunku do całkowitego zużycia energii w operacjach agrotechnicznych przy różnych wariantach uprawy, metodą UTU.....	168

Rys. 53.	Odległość poza polem, D_{tr} , w stosunku do całkowitego zużycia energii w operacjach agrotechnicznych przy różnych wariantach uprawy, metodą siewu bezpośredniego.....	168
Rys. 54.	Schemat blokowy algorytmu obliczeń dla jednej operacji.....	173
Rys. 55.	Charakterystyka topologiczna pól.....	174
Rys. 56.	Stosunek odległości przejechanej na zewnątrz i wewnątrz plantacji, D_{out}/D_{agr} , złożonych z pól o powierzchni 1 ha w zależności od odległości między plantacjami, l , dla różnych odległości od bazy, c , i szerokości pasa obróbki 4 m.....	177
Rys. 57.	Stosunek odległości przejechanej na zewnątrz i wewnątrz plantacji, D_{out}/D_{agr} , złożonych z pól o powierzchni 25 ha w zależności od odległości między plantacjami, l , dla różnych odległości od bazy, c , i szerokości pasa obróbki 4 m.....	177
Rys. 58.	Stosunek odległości przejechanej na zewnątrz i wewnątrz plantacji, D_{out}/D_{agr} , złożonych z pól o powierzchni 1 ha w zależności od odległości między plantacjami, l , dla różnych odległości od bazy, c , i szerokości pasa obróbki 0,5 m.....	179
Rys. 59.	Stosunek odległości przejechanej na zewnątrz i wewnątrz plantacji, D_{out}/D_{agr} , złożonych z pól o powierzchni 25 ha w zależności od odległości między plantacjami, l , dla różnych odległości od bazy, c , i szerokości pasa obróbki 0,5 m.....	179

Załącznik

Rys. 1.	Prasa do tłoczenia oleju.....	193
Rys. 2.	Makuchy rzepakowe (wytloki)	194
Rys. 3.	Instalacja do produkcji estrów PEM-300	196
Rys. 4.	Rozwarstwienie związków na metyloester i glicerynę.....	197
Rys. 5.	Pojemnik estryfikatora na filtr sznurkowy	197
Rys. 6.	Gotowy biodiesel	197
Rys. 7.	Schemat produkcji biodiesla i sposoby zagospodarowania produktów ubocznych w badanym gospodarstwie.....	198