

Janusz WOJDALSKI, Bogdan DRÓŹDŹ  
Katedra Organizacji i Inżynierii Produkcji  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

## Efektywność energetyczna zakładów przemysłu spożywczego Zarys problematyki i podstawowe definicje

### Streszczenie

W pracy przedstawiono podstawowe definicje stosowane do określania efektywności energetycznej w przemyśle spożywczym. Usystematyzowano wiedzę z zakresu przemian nośników energii i podano zakresy wskaźników efektywności energetycznej mogących służyć do oceny pracy zakładów produkcyjnych. Przedstawiono przepływy materiałowo-energetyczne w dwóch przykładowych typach zakładów przemysłu spożywczego na przykładzie przetwórstwa młynarskiego i piekarskiego, różniących się systemami energetycznymi i technologicznymi. Uwzględniając badania własne i dane literaturowe, przedstawiono zróżnicowane wskaźniki efektywności energetycznej w piętnastu branżach przetwórstwa spożywczego.

**Słowa kluczowe:** efektywność energetyczna, przemysł spożywczy, podstawy metodyczne

### Energy efficiency of food processing plants Key issues and definitions

#### Summary

This study presents the basic definitions for determining energy efficiency in the food processing industry. Issues relevant to the transformation of energy carriers were systematized, and ranges of energy efficiency ratios for evaluating the performance of food processing plants were given. Material and energy flows were discussed on the example of three types of food processing plants, including a processing mill and a bakery, with different power and processing systems. The results of the authors' previous work and published data were used to present energy efficiency ratios in fifteen sectors of the food processing industry.

**Key words:** energy efficiency, food processing industry, methodological basis

#### Wykaz oznaczeń:

- $B_{rz}$  – zużycie paliwa rzeczywistego [kg/24 h];  
 $E_c$  – zużycie energii cieplnej ( $E_c = B_{rz} \cdot Q_w^r$ ) [GJ], [GJ/24 h];  
 $E_e$  – zużycie energii elektrycznej czynnej [kW·h/24 h];  
 $E_{u1}$  – całkowite zużycie energii (z uwzględnieniem przeliczenia 1 kW·h = 3,6/0,3 = 12 MJ), gdzie: 0,3 oznacza współczynnik sprawności przemian i przesyłania energii elektrycznej [GJ/24 h];  
 $E_{u2}$  – całkowite zużycie energii (uwzględniając przelicznik 1 kW·h = 0,0036GJ) [GJ/24 h];  
 $EE_A$  – agregatowy wskaźnik efektywności energetycznej;  
 $EE_c$  – zakładowy wskaźnik efektywności energetycznej dotyczący energii cieplnej [ $\text{kg} \cdot (\text{MJ})^{-1}$ ];  
 $EE_e$  – zakładowy wskaźnik efektywności energetycznej dotyczący zużycia energii elektrycznej [ $\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ ];  
 $EE_P$  – produkcyjny wskaźnik efektywności energetycznej;  
 $EE_T$  – zakładowy wskaźnik efektywności energetycznej;  
 $EE_{t1}$  – zakładowy wskaźnik efektywności energetycznej dotyczący zużycia energii ogółem (z uwzględnieniem przeliczenia 1 kW·h = 3,6/0,3 = 12 MJ) gdzie: 0,3 oznacza współczynnik sprawności przemian i przesyłania energii elektrycznej [ $\text{kg} \cdot (\text{MJ})^{-1}$ ];  
 $EE_{t2}$  – zakładowy wskaźnik efektywności energetycznej dotyczący zużycia energii ogółem (z uwzględnieniem przeliczenia 1 kW·h = 3,6 MJ) [ $\text{kg} \cdot (\text{MJ})^{-1}$ ];  
 $EE_z$  – zakładowy wskaźnik efektywności energetycznej;  
 $E_1 \dots E_4$  – energia dostarczana na poszczególne poziomy użytkowania;
- $F$  – powierzchnia wymiany ciepła, [ $\text{m}^2$ ];  
 $k$  – współczynnik przenikania ciepła, [ $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ ];  
 $n_1$  – liczba osób zatrudnionych w sferze produkcyjnej zakładu;  
 $n_2$  – liczba osób zatrudnionych ogółem w zakładzie;  
 $P$  – całkowita moc zainstalowana zakładu [kW];  
 $P_1 \dots P_n$  – struktura mocy zainstalowanej urządzeń elektrycznych [kW];  
 $S_1$  – powierzchnia terenu zakładu pod zabudowę [ $\text{m}^2$ ];  
 $S_2$  – powierzchnia terenu zakładu ogółem [ $\text{m}^2$ ];  
 $STR$  – współczynnik strat energii na poszczególnych poziomach użytkowania;  
 $Q_w^r$  – wartość opałowa paliwa rzeczywistego [ $\text{GJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];  
 $\dot{Q}$  – aktualna moc cieplna [W];  
 $\dot{Q}_{\text{max}}$  – maksymalna możliwa moc cieplna [W];  
 $Q_n$  – straty energii na poszczególnych poziomach użytkowania;  
 $V_1$  – kubatura pomieszczeń produkcyjnych zakładu [ $\text{m}^3$ ];  
 $V_2$  – kubatura pomieszczeń zakładu ogółem [ $\text{m}^3$ ];  
 $Z$  – dobowo wielkość produkcji [kg produktu/24h], [ $\text{m}^3/24\text{h}$ ];  
 $Z_1 \dots Z_n$  – dobowo struktura przerobu lub produkcji [Mg];  
 $\eta$  – współczynnik sprawności, efektywność cieplna wymiennika;  
 $\eta_A$  – efektywność przemian na poziomie A;  
 $\eta_B$  – efektywność przemian na poziomie B;  
 $\eta_C$  – efektywność przemian na poziomie C;  
 $\Delta t_m$  – średnia logarytmiczna różnica temperatur [K], [ $^{\circ}\text{C}$ ].

#### Wstęp

Zużycie nośników energii w zakładach przetwórstwa rolno-spożywczego zależy od wielu czynników, spośród których wymienia się np.: właściwości termofizyczne surowców, wymagania stawiane produktowi, technologię produkcji, wielkość i strukturę produkcji, wyposażenie techniczne, stopień zmechanizowania operacji produkcyjnych,

stopień wykorzystania zdolności przerobowej oraz organizację produkcji. Efektywność energetyczna ( $EE$ ) jest określana jako stosunek uzyskanej wielkości efektu użytkowego danego urządzenia, instalacji lub zakładu produkcyjnego w typowych warunkach ich użytkowania lub eksploatacji, do ilości zużytej energii przez to urządzenie, instalację lub zakład produkcyjny niezbędnej do uzyskania wymienione-

go efektu. Jest też określana jako skutek działalności produkcyjnej (przemysłowej), będący ilorazem uzyskanego efektu i poniesionego nakładu. Wzrost efektywności energetycznej ( $EE$ ) może nastąpić pod wpływem zmniejszenia zużycia energii, które ma miejsce na etapie przetwarzania, dystrybucji lub końcowego zużycia wynikającego ze zmian w technologii produkcji (Grochowicz, Zawisłak 2012). Stosując wskaźniki efektywności energetycznej można uwzględniać dodatkowe dane charakteryzujące zakład produkcyjny. Zagadnienie to było w pewnym stopniu definiowane w literaturze przedmiotu np. Patterson (1996); Philipsen i in. (1997); Mahlia i in. (2002); Wojdalski i in. 2007a) jak też wyrażano opinie o charakterze krytycznym lub dyskusyjnym (np. Herring 2006). Gospodarcze znaczenie efektywności energetycznej jest wymieniane zwłaszcza w przypadkach poprawy użytkowania energii w budynkach o różnym przeznaczeniu (np. Markis, Paravantis 2007). W czasopiśmie Energy Efficiency, można odnaleźć też prace dotyczące gospodarki żywnościowej (np. Wilhite 2008). Poprawa efektywności energetycznej związana jest m.in. ze zmniejszeniem zużycia energii podczas przemian, przesyłania i jej finalnego wykorzystania. Racjonalne użytkowanie energii ściśle związane jest z przejawem ekoelektywności, polegającej na poprawie wyników środowiskowych związanych z: poszanowaniem energii, zmniejszaniem zużycia zasobów naturalnych, redukcją emisji zanieczyszczeń oraz ograniczaniem ilości wytwarzanych odpadów na każdym etapie przetwarzania surowców.

Celem niniejszej pracy jest próba uporządkowania wiedzy na temat czynników wpływających na efektywność energetyczną przemysłu spożywczego. Wśród celów pracy jest:

- przedstawienie metodycznych podstaw ogólnej analizy efektywności energetycznej zakładów przetwórstwa spożywczego z uwzględnieniem sprawności przemian energii oraz czynników mających wpływ na kształtowanie się energochłonności bezpośredniej;
- przegląd dotychczasowych badań z tego zakresu, z uwzględnieniem własnych prac;
- synteza najważniejszych zagadnień z literatury uzupełniającej przydatnych w analizie efektywności energetycznej przetwórstwa spożywczego i do budowy modeli zakładów

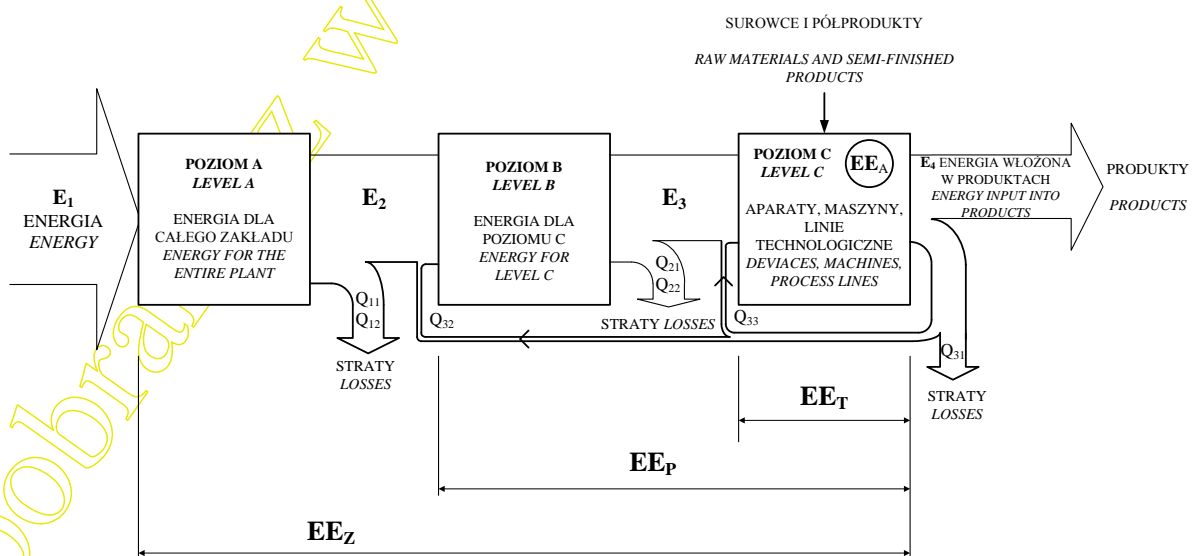
produkcyjnych, jako użytkowników energii;

- wskazanie branż przetwórstwa spożywczego, w których istnieją największe potrzeby poprawy efektywności energetycznej.

Inspiracją do podejmowania badań z tego zakresu może być m.in. praca Bunse i in. (2011), w której autorzy wskazują na luki między zapotrzebowaniem zgłaszanym przez zakłady produkcyjne a treścią opracowań naukowych.

### Zakres analiz użytkowania energii

Do oceny energochłonności bezpośredniej przemysłu spożywczego stosuje się głównie metodyki określania wskaźników jednostkowego zużycia energii nośników energii (Wytyczne 1983; Metoda 1986, 1987; Wojdalski i in. 1998; Wojdalski, Drożdź 2006). Wskaźniki te można przekształcać otrzymując wyrażenia zgodne z przedstawionymi definicjami efektywności energetycznej. Zależnie od poziomu odniesienia, zakresu i szczegółowości analiz efektywności energetycznej można stosować następujące wskaźniki: agregatowy ( $EE_A$ ), technologiczny ( $EE_T$ ), produkcyjny ( $EE_P$ ) i zakładowy ( $EE_Z$ ), przy czym wymienione wskaźniki mogą być też określane jako np. średnie w danej grupie zakładów lub całej branży (Xu, Flapper 2009). Stosuje się także współczynniki efektywności przemian energii  $\eta$ . Specyficzne cechy różnych branż przemysłu rolno-spożywczego istotne z punktu widzenia rozpatrywania ich efektywności energetycznej można rozpatrywać również w postaci zróżnicowanych zakresów analiz gospodarki energią i surowcem w pracach: Budnego (1988); Brodowicza, Markowskiego (1997); Grzybek (2003); Hufendieka, Klemeša (1997); Kowalczyka (2006); oraz Mullera i in. (2007). Należy zaznaczyć, że wprowadzanie najlepszych dostępnych technik produkcyjnych (BAT) wymaga bardziej szczegółowych niż dotychczas metod analiz efektywności energetycznej produkcji. Na rysunku 1 przedstawiono teoretyczny przebieg przemian, dotyczący doskonałości energetycznej przygotowania nośników i przemian na różnych poziomach (etapach) odniesienia w nawiązaniu do definicji efektywności energetycznej.



Rys. 1. Etapy przemian energii i zakresy stosowane do określania wskaźników efektywności energetycznej.

Fig. 1. Energy transformation stages and ranges applied to determine energy efficiency ratios.

Wraz z zachodzącymi na poszczególnych poziomach przemianami występują różne straty np.  $Q_{11}$ ,  $Q_{12}$ ,  $Q_{21}$ ,  $Q_{22}$ ,  $Q_{31}$  itd. uwzględnione na wykresie Sankey'a. Można wyodrębnić trzy najważniejsze poziomy (etapy) przemian i użytkowania nośników energii:

A. Zasilanie w nośniki brutto. Na tym poziomie są prowadzone pomiary łącznego zużycia nośników energii ( $E_1$ ), niezbędne do określenia zakładowego wskaźnika efektywności energetycznej. Straty energii występujące na tym poziomie mogą wynikać np. z niepełnego obciążenia transformatorów i ubytków paliwa kierowanego do kotłów parowych. Efektywność przemian określa wzór 1:

$$\eta_A = \frac{E_2}{E_1} = \frac{E_1 - Q_{11} - Q_{12}}{E_1} \quad (1)$$

B. Przemiany nośników energii dostarczanych z poziomu A. W zależności od potrzeb i specyfiki branży można stwierdzić że występują tu różne ogniwa przemian strumienia ( $E_2 + Q_{32}$ ). Efektywność energetyczną (cieplną)  $\eta$ , występujących tu wymienników, można wyrazić jako stosunek dwóch mocy cieplnych:

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} \quad (2)$$

przy czym maksymalna możliwa wielkość  $\dot{Q}_{\max}$  jest ograniczona, w wymienniku ciepła, różnicą temperatur czynników na wejściu wymiennika. W niektórych analizach efektywność energetyczna  $\eta$  jest traktowana jako wydajność określana przy pomocy strumienia ciepła  $\dot{Q}$  wyznaczanego z zależności:

$$\dot{Q} = k \cdot F \cdot \Delta t_m \quad (3)$$

Z przemysłowego punktu widzenia (tj. produktu końcowego), aby zwiększyć efektywność wymiany ciepła w poszczególnych wymiennikach, należy dążyć do osiągnięcia jak największych wartości współczynnika  $k$ . Jeżeli w przedstawionym wzorze  $\dot{Q}_{\max}$  przyjmie wartość stałą, wtedy wzrost osiąganego strumienia ciepła  $\dot{Q}$  wpłynie na wzrost ogólnej efektywności  $\eta$ . Równocześnie technologia produkcji wymaga, aby wartość  $\dot{Q}$  była stała i była ona traktowana jako energia włożona. W tych warunkach  $\dot{Q}_{\max}$  powinna być tak dobrana, aby osiągnąć największe wartości współczynnika efektywności cieplnej  $\eta$ , co omawiano m. in. w pracy Fryer, Robins (2005). Na tym poziomie występują możliwości kogeneracji (tj. skojarzonej gospodarki energią - CHP - Combined Heat and Power), która jest procesem technologicznym jednoczesnego wytwarzania energii elektrycznej i użytkowej energii cieplnej, zazwyczaj w elektrociepłowni. Ze względu na zmniejszone zużycie nośników energii, zastosowanie kogeneracji daje możliwość oszczędności ekonomicznych i jest korzystne z ekologicznego punktu widzenia - w porównaniu z klasyczną ciepłownią, w której występuje odrębne wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej. Poligeneracja obejmuje systemy konwersji energii z jedne-

go lub większej liczby źródeł (odnawialnych i nieodnawialnych), w wyniku których powstają trzy produkty lub więcej. Trigeneracja jest też poligeneracją. Quadgeneracja lub QUAD/CHP jest kolejną skojarzoną technologią, w tym przypadku wytwarzania energii cieplnej, elektrycznej, chłodu użytkowego i dwutlenku węgla ze spalania gazu ziemnego, jako paliwa zużywanego w tej technologii. Przykłady zastosowania kogeneracji, trigeneracji lub quadgeneracji przedstawili: w zakładach cukrowniczych (Laudański 2007), piwowarskich (Hufendiek, Klemes 1997), drobiarskich (Bianchi i in. 2006), produkcji makaronów (Panno i in. 2007) i produkcji napojów bezalkoholowych (Maryniak 2011). Inne przykłady można znaleźć w pracach: Bieranowski, Klonowski (2005); Calderan i in. (1992); Myczko i in. (2011); Piacentino, Cardona (2008); Tassou i in. (2007). Współczynnik efektywności przemian na tym etapie można określić jako:

$$\eta_B = \frac{E_3}{E_2 + Q_{32}} = \frac{E_2 + Q_{32} - Q_{21} - Q_{22}}{E_2 + Q_{32}} \quad (4)$$

C. Użytkowanie nośników energii. Na tym poziomie występują typowe urządzenia, aparatura i instalacje produkcyjne, niezbędne do realizacji procesów i operacji jednostkowych dla przyjętej technologii. Poziom ten obejmuje strumień energii końcowej ( $E_3 + Q_{33}$ ), wprowadzonej do procesów i operacji produkcyjnych bez dalszego przetworzenia jej nośników na inne nośniki energii (np. paliwo zużyte w piecu piekarskim, olej napędowy w środku transportu, woda gorąca w wymienniku ciepła, ciepło w parze wodnej, praca mechaniczna, sprężone powietrze, „zimno”, oświetlenie). Efektywność energetyczna występujących tu odbiorników może być rozpatrywana podobnie jak na poziomie B zarówno z wykorzystaniem wzorów 2 i 3 jak też stosując wskaźniki  $EE_A$  i  $EE_T$ . Należy zaznaczyć, że z poziomu C są odprowadzane strumienie energii zazwyczaj odpadowej  $Q_{32}$  na poziom B i  $Q_{33}$  na poziom C (np. recykulacja podgrzanego powietrza). Sumaryczny współczynnik efektywności przemian wyraża się w postaci wzoru 5:

$$\eta_C = \frac{E_4}{E_3 + Q_{33}} = \frac{E_3 + Q_{33} - Q_{31} - Q_{32} - Q_{33}}{E_3 + Q_{33}} = \frac{E_3 - Q_{31} - Q_{32}}{E_3 + Q_{33}} \quad (5)$$

Energia wykorzystana ( $E_4$ ) odpowiada użytecznie wykorzystanej energii niezbędnej (energii włożonej) do uzyskania produktu finalnego (gotowego) w zakładzie produkcyjnym. Może być też uznana jako poziom odniesienia dla energii wprowadzanej do zakładu produkcyjnego.

Efektywność energetyczna przemian w zakładzie produkcyjnym, traktowanym jako całość, można przedstawić posługując się wyrażeniem (6):

$$\eta_Z = \frac{E_4}{E_1} = \frac{E_1 - Q_{11} - Q_{12} - Q_{21} - Q_{22} - Q_{31}}{E_1} \quad (6)$$

Na podstawie równań (1), (4), (5) można także określić współczynniki strat energii (STR) przedstawiony w tabeli 1.

Tabela 1. Współczynniki strat energii na poszczególnych etapach przemian  
 Table 1. Energy loss coefficients at various stages of transformation

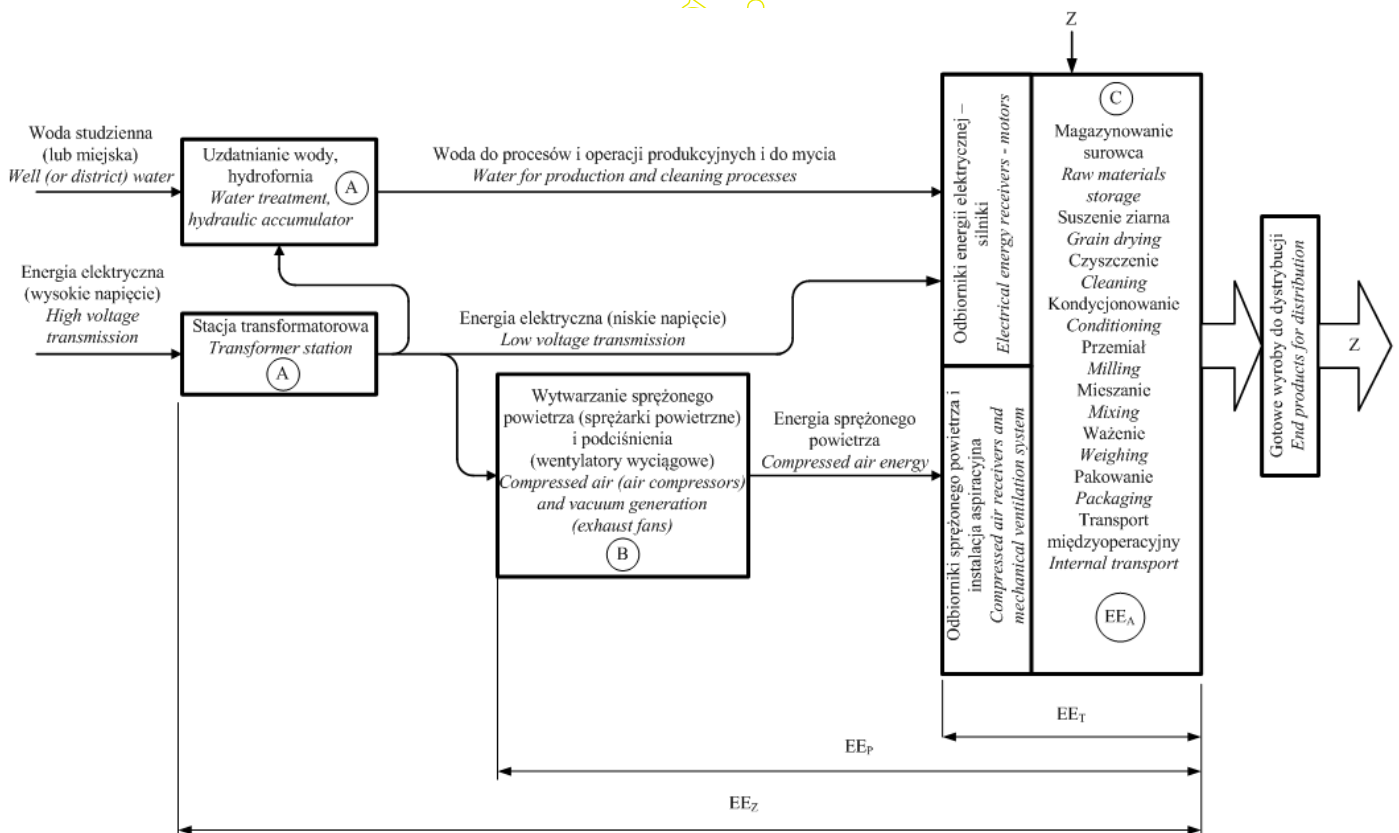
Poziom odniesienia/ etap przemian; Reference level/ transformation stage	Współczynniki strat; Loss coefficients
A	$STR_{A1} = \frac{Q_{11}}{E_1}; STR_{A2} = \frac{Q_{12}}{E_1}$
B	$STR_{B1} = \frac{Q_{21}}{E_2 + Q_{32}}; STR_{B2} = \frac{Q_{22}}{E_2 + Q_{32}}$
C	$STR_{C1} = \frac{Q_{31}}{E_3 + Q_{33}}; STR_{C2} = \frac{Q_{32}}{E_3 + Q_{33}}$

W największym stopniu znana jest wartość  $\eta_B$  (wzór 4), która dla przemysłu spożywczego ogółem wynosi ponad 0,67. Np. w zakładach jajczarsko-drobiarskich i spirytusowo-drożdżowych wynosi odpowiednio 0,692 i 0,731. Wzrost współczynnika  $\eta_B$ , wynika głównie z instalowania kotłów parowych o wyższych sprawnościach. Użytkowanie energii przez aparaturę poszczególne maszyny i aparaty w liniach produkcyjnych odbywa się na poziomie C (rys. 1, tab. 1). Współczynniki  $\eta_C$  dla operacji produkcyjnych, realizowanych na tym poziomie, można określić korzystając z przykładowego piśmiennictwa: Donsi i in. (2010), Dziki, Lasowski (2005, 2006), European Commission (2006), Flizkowski i in. (1994), Gogate (2011), Grochowicz, Walczyński (2004), Savoire i in. (2012), Sridhar, Manohar (2001). Na

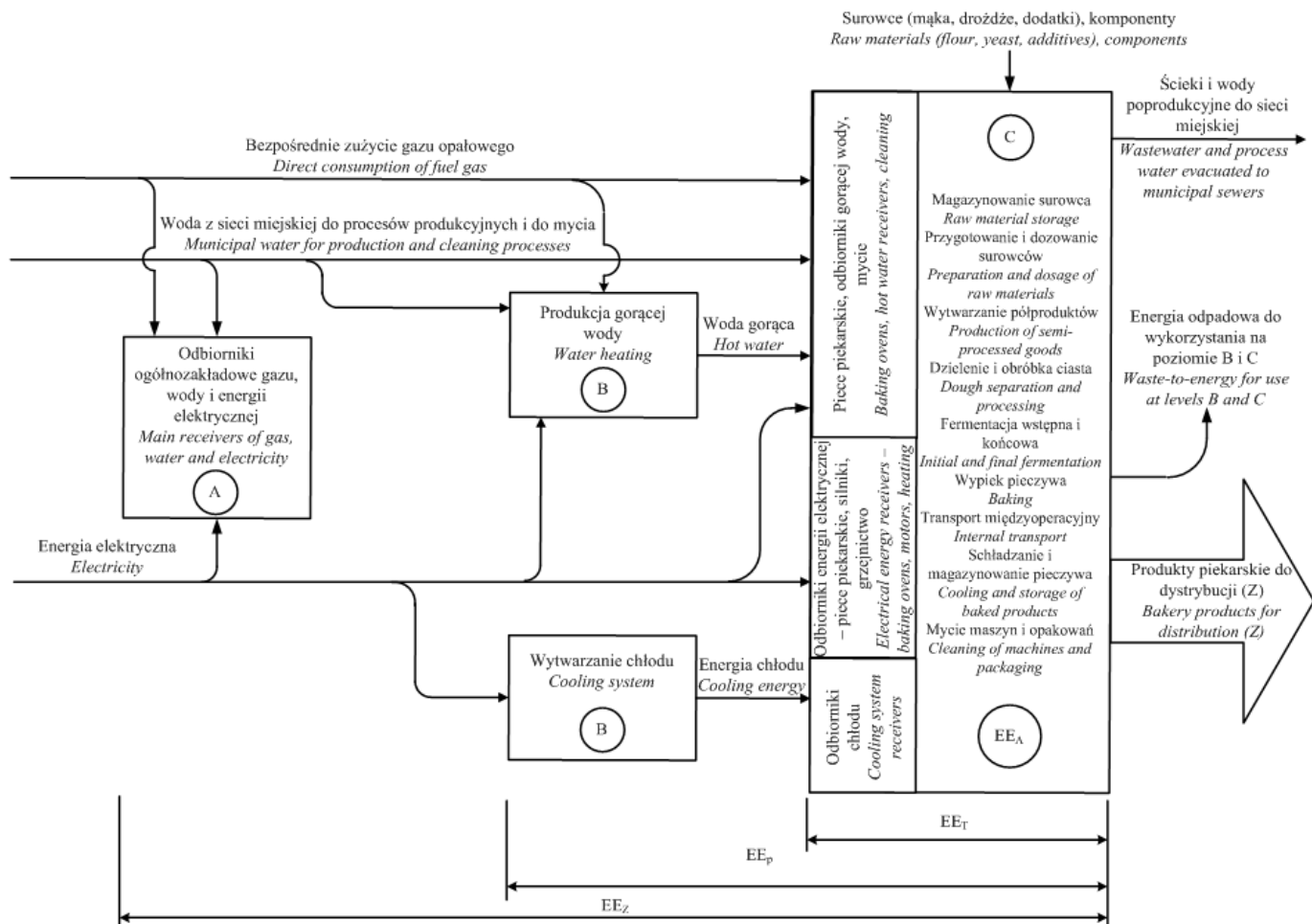
poziomie C występuje także mycie aparatury, któremu jest poświęcona np. praca Diakuna i in. (2012). Przykład analizy przydatnej w badaniach efektywności energetycznej przemysłowej instalacji cieplnej przedstawił np. Bhatt (2000).

**Schematy zakładów produkcyjnych, jako użytkowników energii**

Zakłady produkcyjne stosują różne technologie produkcji i mają zróżnicowane systemy przepływów materiałowo-energetycznych. Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono przykładowe schematy zakładów przemysłu spożywczego jako użytkowników nośników energii (na przykładzie zakładów młynarskiego i piekarskiego). Uwzględniono również straty energii występujące na wymienionych poziomach przemian energetycznych jak i sumaryczne straty na poziomie wskaźnika zakładowego. Oznaczenia A, B, C (wymienione w tabeli 1 i na rysunkach 2 i 3) dotyczą grup odbiorników energii, charakterystycznych dla poszczególnych poziomów przemian energii i jednocześnie zakresów wskaźników jednostkowego zużycia energii przedstawionych na rysunku 1. Przedstawione schematy zakładów przemysłu spożywczego mogą być podstawą do bardziej szczegółowej analizy energochłonności produkcji i efektywności energetycznej przy pomocy modelu komorowego. Oryginalną i rozbudowaną postać tego modelu wraz z weryfikacją dla cukrowni opracował Laudanski (2007).



Rys. 2. Zakład młynarski jako użytkownik nośników energii.  
 Fig. 2. Milling plant as a user of energy carriers.



Rys. 3. Zakład piekarski jako użytkownik nośników energii.

Fig. 3. Baking plant as a user of energy carriers.

### Czynniki wpływające na efektywność energetyczną zakładów produkcyjnych

Do charakterystyki zakładów produkcyjnych można przyjmować następujące wielkości:  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $P$ , ( $P_1 \dots P_n$ ),  $Z$ , ( $Z_1 \dots Z_n$ ). W tabeli 2 dodatkowo przedstawiono wskaźniki mogące służyć zarówno do charakterystyki instalacji i zakładów produkcyjnych, jak też jako czynniki wpływające na efektywność energetyczną obiektów. Do oceny efektywności energetycznej produkcji zakładów przemysłu

rolno-spożywczego można zastosować metodę wskaźnikową, która pozwala na bieżącą analizę funkcjonowania obiektu. Poprzez porównanie z wynikami uzyskiwanymi w podobnych zakładach (benchmarking) można wskazać kierunki możliwych zmian, których celem powinno być zwiększenie efektywności energetycznej. Do charakterystyki gospodarki energetycznej zakładów przemysłu spożywczego można przyjmować wskaźniki zawarte w tabeli 2.

Tabela 2. Przykładowe wskaźniki stosowane do charakterystyki zakładów przemysłu spożywczego i ich efektywności energetycznej

Table 2. Indicators for determining the operating parameters of food processing plants and their energy efficiency

L.p. Item	Sens fizyczny/znaczenie; Physical property/meaning	Formuła; Formula	Jednostki; Units
1.	Zużycie energii elektrycznej odniesione do liczby zatrudnionych bezpośrednio w produkcji; Electrical energy consumption relative to the number of staff directly employed in the production process	$U_{el1} = \frac{E_e}{n_1}$	kW-h/osobę; kW-h/person
2.	Zużycie energii elektrycznej odniesione do liczby zatrudnionych ogółem w zakładzie; Electrical energy consumption relative to the total number of staff employed in the plant	$U_{el2} = \frac{E_e}{n_2}$	kW-h/osobę; kW-h/person
3.	Moc zainstalowana odniesiona do liczby zatrudnionych bezpośrednio w produkcji; Installed power relative to the number of staff directly employed in the production process	$U_{en1} = \frac{P}{n_1}$	kW /osobę; kW/person
4.	Moc zainstalowana odniesiona do liczby zatrudnionych ogółem; Installed power relative to the total number of employed staff	$U_{en2} = \frac{P}{n_2}$	kW /osobę; kW/person

5.	Masa przerabianych surowców lub otrzymanych produktów odniesiona do mocy zainstalowanej urządzeń elektrycznych; Weight of processed raw materials and products relative to installed power of electrical devices	$K_{EP} = \frac{Z}{P}; K_{EP} = \frac{Z_1 + \dots + Z_n}{P}$	Mg/kW
6.	Dobowy przerób surowców lub otrzymanych produktów na 1 zatrudnionego bezpośrednio w produkcji; Daily processing capacity of raw materials and products per employee directly involved in the production process	$K_{p1} = \frac{Z}{n_1}; K_{p1} = \frac{Z_1 + \dots + Z_n}{n_1}$	Mg/osobę; Mg/person
7.	Dobowy przerób surowców lub otrzymanych produktów na 1 zatrudnionego w zakładzie ogółem; Daily processing capacity of raw materials and products per plant employee	$K_{p2} = \frac{Z}{n_2}; K_{p2} = \frac{Z_1 + \dots + Z_n}{n_2}$	Mg/osobę; Mg/person
8.	Masa przerobionych surowców odniesiona do kubatury pomieszczeń produkcyjnych; Weight of processed raw materials relative to the volume of production facilities	$K_{V1} = \frac{Z}{V_1}$	Mg/m <sup>3</sup>
9.	Masa przerobionych surowców odniesiona do kubatury pomieszczeń ogółem; Weight of processed raw materials relative to the total volume of facilities	$K_{V2} = \frac{Z}{V_2}$	Mg/m <sup>3</sup>
10.	Masa przerabianych surowców lub otrzymanych produktów przypadająca na powierzchnię terenu zajętego pod zabudowę; Weight of processed raw materials and products relative to plant area occupied by buildings	$K_{S1} = \frac{Z}{S_1}; K_{S1} = \frac{Z_1 + \dots + Z_n}{S_1}$	Mg/m <sup>2</sup>
11.	Masa przerabianych surowców lub otrzymanych produktów przypadająca na powierzchnię terenu ogółem; Weight of processed raw materials and products relative to total plant area	$K_{S2} = \frac{Z}{S_2}; K_{S2} = \frac{Z_1 + \dots + Z_n}{S_2}$	Mg/m <sup>2</sup>
12.	Efektywność zużycia energii elektrycznej dla przerabianych surowców lub gotowych produktów; Electrical efficiency of processed raw materials and products	$EE_e = \frac{Z}{E_e}; EE_e = \frac{Z_1 + \dots + Z_n}{E_e}$	Mg/kW·h
13.	Efektywność zużycia energii cieplnej dla przerabianych surowców lub gotowych produktów Thermal efficiency of processed raw materials and products	$EE_c = \frac{Z}{E_c}; EE_c = \frac{Z_1 + \dots + Z_n}{E_c}$	Mg/GJ
14.	Efektywność zużycia energii ogółem $E_{t1}$ dla przerabianych surowców (Z) lub gotowych produktów ( $Z_1 \dots Z_n$ ) Total energy efficiency $E_{t1}$ of processed raw materials (Z) and products ( $Z_1 \dots Z_n$ )	$EE_{t1} = \frac{Z}{E_{t1}} = \frac{Z}{0,012 \cdot E_e + B_{rz} \cdot Q_w^r \cdot 10^{-6}}$	Mg/GJ
15.	Efektywność zużycia energii ogółem $E_{t2}$ dla przerabianych surowców (Z) lub gotowych produktów ( $Z_1 \dots Z_n$ ) Total energy efficiency $E_{t2}$ of processed raw materials (Z) and products ( $Z_1 \dots Z_n$ )	$EE_{t2} = \frac{Z}{E_{t2}} = \frac{Z}{0,0036 \cdot E_e + B_{rz} \cdot Q_w^r \cdot 10^{-6}}$	Mg/GJ

Do analizy efektywności energetycznej zakładów produkcyjnych można stosować również metodę polegającą na ustaleniu modeli regresyjnych określających zależność  $EE$  od przyjętych grup czynników, które swoim zasięgiem mogą objąć złożoność problemu. Analiza może dotyczyć odrębnych zakładów jak też np. całej branży obejmującej przerób tego samego surowca w obiektach różnej wielkości. Można wymienić różne grupy czynników mających wpływ na efektywność energetyczną zakładów przemysłu spożywczego obejmujących zakres wskaźnika zakładowego  $EE_z$  np.:

- ogólną charakterystyką zakładów produkcyjnych ( $Z, P, V_1, V_2, S_1, S_2, n_1, n_2$ );
- strukturę mocy zainstalowanej urządzeń elektrycznych zakładów ( $P_1 \dots P_n$ );
- strukturę (profil) dobowego przerobu lub produkcji ( $Z_1 \dots Z_n$ );
- wielkości będące funkcjami powyżej wymienionych czynników ( $U_{e1}, U_{e2}, K_{p1}, K_{p2}, K_{V1}, K_{V2}, K_{S1}, K_{S2}, K_{EP}$ ).

Tabela 3. Pozycje literatury przydatne w analizie efektywności energetycznej  
Table 3. Useful references for energy efficiency analyses

Lp. Item	Poruszana problematyka/użyteczne zagadnienia; Problems tackled/useful references	Źródło; Source
1.	Analiza energochłonności małych i średnich przedsiębiorstw; Energy consumption analysis of small and medium-sized plants	Alhourani, Saxena (2009); Muller i in. (2007);
2.	Analiza egzenergetyczna; Exergy analysis	Apaiiah i in. (2006); Sogut i in. (2010); Szargut (1987); Utlu, Hepbasli (2006);
3.	Integracja procesów w zakładach produkcyjnych; Process integration in processing plants	Bernardo i in. (2010) Brodowicz i Markowski (1997); Dunn i Bush (2001); Hufendiek i Klemeš (1997); Urbaniec i Zalewski (2000);

W tabeli 3 przedstawiono syntezę zawartości literatury uzupełniającej, obejmującej jedenaście grup tematycznych dotyczących badania energochłonności produkcji (poz. 1, 2, 5) oraz przydatnej w analizie efektywności energetycznej, (poz. 3, 7, 10).

Prace wymienione w pozycji 3 dotyczą specyficznych cech różnych branż przemysłu spożywczego i użytkowania nośników energii na poszczególnych poziomach zdefiniowanych na rysunku 1. Zmniejszeniu oddziaływania zakładów przemysłu spożywczego na środowisko i równocześnie poprawie ekoefektywności są poświęcone prace wymienione w pozycji 8 i 11. Zagadnienia aparaturowe istotne z punktu widzenia zmniejszenia energochłonności produkcji wymieniono w pozycji 4. Przegląd stosowanych modeli przydatnych w gospodarce energetycznej obejmuje pozycja 9, oraz zagadnienia związane z zarządzaniem w gospodarce energią i w benchmarkingu są objęte w pozycji 6.

4.	Zapotrzebowanie na nośniki energii zakładach w różnych branżach przetwórstwa rolno-spożywczego; Demand for energy carriers in various sectors of the agri-food industry	Audet (1995); Grzybek (2003); Iwaniak (1999); Jekayinfa, Bamgboye (2006, 2007); Jin, Xu (2006); Kaleta, Wojdalski (2008); Kannan, Boie (2003); Klemeš i in. (2008); Kowalczyk (2006); Kowalczyk, Netter (2008); Kusińska i in. (2008); Korpysz i in. (2007); Marks i in. (2006); Mitrus (2005); Muller i in. (2007); Niemiec i in. (2005); Opielak (1997); Ramachandra, Subramanian (1993); Ramirez i in. (2006); Savoie i in. (2012); Simpson i in. (2006); Singh (1986); Tkacz i in. (2000); Trojanowska (1993); Waheed i in. (2008); Wojdalski i in. (2007b, c; 2008a, b); Xu i in. (2009); Zawisłak (2001);
5.	Metodyczne aspekty analizy i zmniejszenia energochłonności (podwyższanie efektywności energetycznej); Methodological aspects of energy consumption reduction and analysis (increasing energy efficiency)	Boonekamp (2006); Marechal i Kalitventzeff (1996); Pawełtas (2010); Piechocki (1997); Salta i in. (2009); Skorek i in. (2000); Urbaniec (1994); Wojdalski i in. (1998); Xiao-Ping i in. (2008);
6.	Wskaźniki stosowane w benchmarkingu; Benchmarking indicators	Boyd i in. (2008); Swords i in. (2008);
7.	Efektywność energetyczna przetwarzania nośników energii; Efficiency of energy transformation	Bujak (2008); Fumo i in. (2009); Sondberg, Söderström (2003); Ziębik (2001);
8.	Ekoefektywność działalności produkcyjnej i aspekty środowiskowe zużycia nośników energii; Eco-efficiency and environmental aspects of energy consumption	Burnett, Hansen (2008); Panasiewicz i in. (2012); Prasad i in. (2004); Zhou i in. (2006);
9.	Modelowanie produkcji przemysłowej i zużycia nośników energii; Modeling industrial production and energy consumption	Camero, Ingram (2008); Iciek i in. (1988); Jebaraj, Iniyar (2006); Skowroński (1994); Vogt (2004); Zhang, Datta (2006);
10.	Efektywność energetyczna w różnych branżach przetwórstwa rolno-spożywczego; Energy efficiency in various sectors of the agri-food industry	Fritzson, Berntsson (2006); Kamiński, Leduc (2010); Wang (2008);
11.	Wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych, substytucja nośników energii; Use of energy from renewable sources, substitution of energy carriers	Ledakowic, Krzystek (2005); Lipski i in. (2006); Niedziółka i in. (2006); Niedziółka, Zuchniarz (2006); Rosiński (2006); Thompson (2006);

### Przykłady wyników badań efektywności energetycznej w przemyśle spożywczym

W tabelach 4 – 6 przedstawiono zakresy wskaźników efektywności energetycznej dla zakładów wybranych branż przetwórstwa rolno-spożywczego. Tabela 4 zawiera wyniki badań dotyczące produkcji piekarskiej, obejmujące

trzy zakresy wskaźników zdefiniowanych na rysunku 3. W tabelach 5 i 6 zawarto wyniki badań zakładowych ( $EE_z$ ) wskaźników efektywności energetycznej (zdefiniowanych na rysunkach 1 i 2) otrzymane na podstawie literatury źródłowej.

Tabela 4. Efektywność energetyczna w produkcji piekarskiej na różnych poziomach przemian energii

Table 4. Energy efficiency in the bakery industry at different energy transformation levels

Nośniki energii i oznaczenia; Energy carriers and symbols	Jednostki; Units	Wskaźniki; Indicators		Średnio; Average	Źródło; Source
		Zakres; Range	Wartości liczbowe; Numerical values		
Energia elektryczna Electrical energy $EE_e$	[kg pieczywa/kWh] [kg baked products/kWh]	$EE_z$	12,9–49,5	–	Neryng i in. (1990)
	[kg pieczywa/kWh] [kg baked products/kWh]	$EE_z$	4,13–14,94	–	Wojdalski i in. (2007a)
	[kg ciasta chlebowego/kWh] [kg dough/kWh]	$EE_A$	427,3–578,0	–	Neryng i in. (1990)
	[kg mąki/kWh] <sup>2</sup> [kg flour/kWh] <sup>2</sup>	$EE_z$	–	2,611	Kannan, Boie (2003)
	[kg pieczywa/G] [kg baked products/G]	$EE_z$	162,34–333,33	–	Wojdalski (1992)
Energia cieplna Thermal energy $EE_c$	[kg pieczywa/MJ] [kg baked products/MJ]	$EE_T$	0,14–2,22	–	Le-bail i in. (2010)
	[kg pieczywa/G] [kg baked products/G]	$EE_z$	142,45–847,45	–	Wojdalski i in. (2007a)
	[kg mąki/kWh] <sup>2</sup> [kg flour/kWh] <sup>2</sup>	$EE_z$	–	1,016	Kannan, Boie (2003)
	[kg pieczywa/G] [kg baked products/G]	$EE_z$	118,08–400,52	–	Wojdalski i in. (2007a)
Energia ogółem Total energy $EE_t$	$EE_{t1}$ [kg pieczywa/G] $EE_{t1}$ [kg baked products/G]	$EE_z$	0,294–4,016	–	Krzysztofik, Łapczyńska-Kordon (2008)
	$EE_{t2}$ [kg pieczywa/MJ] $EE_{t2}$ [kg baked products/MJ]	$EE_z$	–	0,404	Krzysztofik (2005)
	$EE_{t2}$ [kg mąki/kWh] <sup>2</sup> $EE_{t2}$ [kg flour/kWh] <sup>2</sup>	$EE_z$	–	0,731	Kannan, Boie (2003)
	$EE_{t2}$ [kg mąki/kWh] <sup>2</sup> $EE_{t2}$ [kg flour/kWh] <sup>2</sup>	$EE_z$	–	0,731	Kannan, Boie (2003)

Objaśnienia do tabeli: 1 – zużycie energii w procesie mieszenia ciasta chlebowego (na podstawie badań laboratoryjnych Domagały);

2 – masa przerobionego surowca (mąki) odniesiona do jednostki zużytej energii elektrycznej.

Key: 1 – energy consumption in the dough mixing process (source: laboratory study by Domagała);

2 – weight of processed raw materials (flour) per unit of consumed electrical energy.

Tabela 5. Zakładowe wskaźniki efektywności energetycznej ( $EE_e$ ) w przetwórstwie rolno-spożywczymTable 5. Energy efficiency indicators ( $EE_e$ ) in agri-food processing plants

Branża, zakłady produkcyjne; Industry, processing plants		Wymiar; Volume	Wartości liczbowe; Numeric values		Źródło; Source
			Zakres; Range	Średnia; Average	
Zakłady cukrownicze; Sugar mills	[kg buraków/kW·h] [kg beets/kW·h]	16,7–50,0	33,3	WS Atkins Int. (1998)	
	[kg cukru/kW·h] [kg sugar/kW·h]	120–510	240		
Zakłady mięsne; Meat processing plants	[kg buraków/kWh] [kg beets/kWh]	27,8–38,4	33,3	Laudański (2007)	
	[kg żywca/kW·h] [kg livestock/kW·h] [kg produktu/kW·h] [kg products/kW·h]	0,41–12,50 0,12–14,30	1,39 0,79	WS Atkins Int. (1998)	
Zakłady mleczarskie; Dairy plants	z proszkiem mleka; with milk powder plant	[l mleka/kW·h] [l milk/kW·h]	-	19,7 i 24,0*	Wojdalski (1991)
	bez proszku mleka; without milk powder plant	[l mleka/kW·h] [l milk/kW·h]	-	25,0 i 25,3*	
Zakłady owocowo-warzywne; Fruit and vegetable processing plants	[kg surowców/kW·h] [kg raw materials/kW·h]	0,10–20,00 0,68–45,25	1,39 1,75	WS Atkins Int. (1998) Wojdalski i in. (2007b)	
	Zakłady piwowarskie; Breweries	[l piwa/kW·h] [l beer/kW·h]	od 5 55,6–142,8	10 -	WS Atkins Int. (1998) Neryng i in. (1990)
Zakłady drobiarskie; Poultry plants	[szt. ptaków/kW·h] [birds/kW·h]	0,12–1,67	0,48	WS Atkins Int. (1998)	
	[kg produktu/kW·h] [kg products/kW·h]	0,42–3,45	1,41		
	[kg produktu/kW·h] [kg products/kW·h]	-	5	Neryng i in. (1990) based on Straszewski	
	[kg produktu/kW·h] [kg products/kW·h]	4,0–4,4	-	Dróżdź, Wojdalski (2004)	
Zakłady utylizacyjne; Recycling plants	[kg surowców/kW·h] [kg raw materials/kW·h]	8,33–33,33	16,67	WS Atkins Int. (1998)	
	[kg produktu/kW·h] [kg products/kW·h]	3,45–11,11	6,25		
Zakłady ziemniaczane (przetwórstwo skrobiowe); Potato (starch processing) plants	[kg ziemniaków/kW·h] [kg potatoes/kW·h] [kg skrobi/kW·h] [kg starch/kW·h]	2,50–16,67 0,43–3,45	15,38 1,20	WS Atkins Int. (1998)	
Zakłady spirytusowo-drożdżowe (bez gorzelnii); Spirits and yeast plants (without distilleries)	[l spirytusu rektyfikowanego/kW·h] [l rectified spirits/kW·h]	0,55–10,00	2,50	WS Atkins Int. (1998)	
Gorzelnie rolnicze; Distilleries	[l produkowanego alkoholu/kW·h] [l produced alcohol/kW·h]	1,67–10,00 3,22–17,24	5,00 -	WS Atkins International (1998) Neryng i in. (1990)	
	Zakłady przetwórstwa nasion oleistych; Oilseed processing plants	[kg nasion/kW·h] [kg seeds/kW·h]	4,17–16,67	7,69	WS Atkins Int. (1998)
[kg oleju rafinowanego/kW·h] [kg refined oil/kW·h]		2,27–5,88	3,45		
Zakłady zbożowo-młynarskie; Cereal and mill plants	[kg nasion/kW·h] [kg seeds/kW·h]	4,71–20,70	-	Dróżdź, Wojdalski (2003)	
	[kg ziarna/kW·h] [kg seeds/kW·h]	12,66–15,38	13,89	Neryng i in. (1990)	
	[kg mąki/kW·h] [kg flour/kW·h]	8,47–9,90	9,17		
	[kg ziarna/kW·h] [kg seeds/kW·h]	9,54–14,20	-	Kiryłuk (2001)	
	[kg mąki/kW·h] [kg flour/kW·h]	7,73–14,20	-		
	[kg ziarna/kW·h] [kg seeds/kW·h]	16,95–18,18	17,61	Dróżdź (2010)	
[kg mąki/kW·h] [kg flour/kW·h]	12,12–12,96	12,56			
Zakłady produkcji napojów bezalkoholowych; Soft drink plants	[szt. butelek/kW·h] [bottles/kW·h]	50,0–80,0	-	Neryng i in. (1990)	
	[litrów/kW·h] [liters/kW·h]	9,86–196,08	26,18	Dróżdź i in. (2002)	
Zakłady paszowe (mieszalnie pasz); Feedstuff plants (Feed mixing)	[kg produktu/kW·h] [kg products/kW·h]	-	118,0 i 82,6	Neryng i in. (1990) based on Grochowicz	
Zakład zielarski; Herb plants	[kg produktu/kW·h] [kg products/kW·h]	0,26–0,60	0,48	Wojdalski i in. (2008c)	

\* zależnie od pory roku tj. odpowiednio lato i zima;

\* subject to season, i.e. summer and winter, respectively.



Tabela 6. Zakładowe wskaźniki efektywności energetycznej (EEc) w przetwórstwie rolno-spożywczym.

Table 6. Energy efficiency indicators (EEc) in agri-food processing plants.

Branża, zakłady produkcyjne; Industry, processing plants		Wymiar; Volume	Wartości liczbowe; Numeric values		Źródło; Source
			Zakres; Range	Średnio; Average	
zakłady cukrownicze; Sugar mills	[buraków/GJ] [kg beets/GJ]		373,1–10000	847,4	WS Atkins Int. (1998)
	[kg cukru/GJ] [kg sugar/GJ]		47,2–1176,5	102,2	
	[kg buraków/ kg paliwa umownego] [kg beets/ kg hypothetical fuel]		20,0–28,6	22,2	Laudański (2007)
	[kg buraków/ kg paliwa umownego] [kg beets/ kg hypothetical fuel]		12,8–32,2	21,3	Urbaniec, Zalewski (2000)
Zakłady mięsne; Meat processing plants	[kg ubitego żywca/GJ] [kg livestock/GJ]		17,2–169,8	77,5	WS Atkins Int. (1998)
	[kg produktów/GJ] [kg products/GJ]		od 4,54	40,1	
Zakłady mleczarskie; Dairy plants	ogółem; total		71,4–8333,3	497,5	WS Atkins Int. (1998)
	z proszkiem mleka; with milk powder plant	[litrów przerabianego mleka/GJ] [liters processed milk/GJ]	-	431,0 i 293,2*	Wojdalski (1991)
	bez proszku mleka without milk; powder plant		-	735,3 i 408,4*	
Zakłady owocowo-warzywne; Fruit and vegetable processing plants	[kg surowca/GJ] [kg raw materials/GJ]		od 30,9 22–5000	120,0 176	WS Atkins Int. (1998) Wojdalski i in (2007b)
	Zakłady piwowarskie; Breweries	[hl piwa/GJ] [hl beer/GJ]		1,89–25,00	4,00
Przetwórstwo drobiarskie; Poultry plants	[szt. ptaków/GJ] [birds/GJ]		19,4–285,7	26,5	WS Atkins Int. (1998)
	[kg produktu/GJ] [kg products/GJ]		52,6–512,8	104,4	
Zakłady utylizacyjne; Recycling plants	[kg surowców/GJ] [kg raw material/GJ]		211,0–320,5	265,2	WS Atkins Int. (1998)
	[kg produktu/GJ] [kg products/GJ]		82,6–121,3	104,4	
Zakłady ziemniaczane (przetwórstwo skrobiowe); Potato (starch processing) plants	[kg ziemniaków/GJ] [kg potatoes/GJ]		45,7–3846,0	307,7	WS Atkins Int. (1998)
	[kg skrobi/GJ] [kg starch/GJ]		34,8–775,2	80,6	
Zakłady spirytusowo-drożdżowe (bez gorzelni); Spirits and yeast plants (without distilleries)	[l produkowanego alkoholu/GJ] [l produced alcohol/GJ]		36,9–1000,0	96,1	WS Atkins Int. (1998)
Gorzelnie rolnicze; Distilleries	[l produkowanego alkoholu/GJ] [l produced alcohol/GJ]		35,3–625,0	82,6	WS Atkins Int. (1998)
Zakłady przetwórstwa nasion oleistych; Oilseed processing plants	[kg nasion/kW-h] [kg seeds/kW-h]		176,3–775,2	301,2	WS Atkins Int. (1998)
	[kg oleju rafinowanego/kW-h] [kg refined oil/kW-h]		86,9–202,8	131,6	
Zakłady produkcji napojów bezalkoholowych; Soft drink plants	[kg nasion/GJ] [kg seeds/GJ]		119,6–735,3	-	Dróżdż, Wojdalski (2002)
	[butelek/GJ] [bottles/GJ]		990–3571	-	Neryng i in (1990)
Zakład zielarski; Herb plants	[tys. litrów/GJ] [1000 liters/GJ]		1,47–9,09	4,00	Dróżdż i in. (2002)
	[kg produktu/GJ] [kg products/GJ]		15,2–69,4	46,1	Wojdalski i in. (2008c)

\* zależnie od pory roku (odpowiednio lato i zima);

\* subject to season, i.e. summer and winter, respectively.

## Podsumowanie

Poszczególne wymienione branże przetwórstwa rolno-spożywczego charakteryzują się znacznie zróżnicowaną efektywnością energetyczną. Największe zróżnicowanie efektywności energetycznej występuje w zakładach branżach owocowo-warzywnej i mięsnej. Np. w zakładach owocowo-warzywnych wykorzystanie 1 kWh jest związane z przerobem ilości surowca różniącą się między sobą zależnie od źródeł od 60 do 200 razy. Wykorzystanie 1 GJ energii cieplnej w zakładach tej branży może być związane z przerobem masy surowców różniących się między sobą nawet

100÷200 krotnie. W zakładach mięsnych wykorzystaniu 1 kWh może towarzyszyć produkcja różniąca się w zakresie od 30 do 100 razy. Podobne zakresy zróżnicowania efektywności wykorzystania 1 GJ mogą występować w zakładach mleczarskich. Z przytoczonych wyników badań, dotyczących produkcji pieczywa, wynika, że w porównaniu z poprzednio wymienionymi branżami, efektywność energetyczna w zakładach branży piekarskiej jest zróżnicowana w mniejszym stopniu i może się różnić najwyżej kilkunastokrotnie. Najmniej zbadana jest efektywność energetyczna w zakładach branż paszowej, zielarskiej i utylizacyjnej.

Ogólnie ujmując można stwierdzić, że efektywność energetyczna w głównym stopniu zależy od grupy czynników składających się na poziom mechanizacji produkcji i stan techniczny, a także od czynników technologicznych specyficznych dla poszczególnych typów zakładów produkcyjnych analizowanych branż. Badania w tym zakresie powinny obejmować wpływ stosowania poligeneracji na ogólną efektywność energetyczną zakładów produkcyjnych, a także zmniejszenie emisji dwutlenku węgla.

## Literatura

1. Alhourani F., Saxena U. 2009. *Factors affecting the implementation rates of energy and productivity recommendations in small and medium sized companies*. Journal of Manufacturing Systems, 28, 41–45.
2. Apaiah R.K., Linnemann A.R., Van der Kooij H.J. 2006. *Exergy analysis: A tool to study the sustainability of food supply chains*. Food Research International, 39, 1–11.
3. Audet L. 1995. *Emerging feed mill technology: keeping competitive*. Animal Feed Science and Technology, 53, 70.
4. Bernardo M., Casadesus M., Karapetrovic S., Heras I. 2010. *An empirical study on the integration of management system audits*. Journal of Cleaner Production, 18, 486–495.
5. Bhatt M.S. 2000. *Energy audit case studies I – steam systems*. Applied Thermal Engineering, 20, 285–296.
6. Bianchi M., Cherubini F., Pascale A.De., Peretto A., Elmegaard B. 2006. *Cogeneration from poultry industry wastes: Indirectly fired gas turbine application*. Energy, 31, 1417–1436.
7. Bieranowski J., Klonowski A. 2005. *Model systemu skojarzonego źródła energii cieplnej w zakładzie przemysłu rolno-spożywczego*. Inżynieria Rolnicza, 6, 33–40.
8. Boonekamp P.G.M. 2006. *Evaluation of methods used to determine realized energy savings*. Energy Policy, 34, 3977–3992.
9. Boyd G., Dutrow E., Tunnessen W. 2008. *The evolution of the Energy Star® energy performance indicator for benchmarking industrial plant manufacturing energy use*. Journal of Cleaner Production, 16, 709–715.
10. Brodowicz K., Markowski M. 1997. *Zastosowanie metody PPT do modernizacji istniejących sieci regeneracyjnych wymienników ciepła*. Gospodarka Paliwami i Energią, 9, 9–13.
11. Bunse K., Vodicka M., Schönsleben P., Brühlhart M., Ernst F.O. 2011. *Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature*. Journal of Cleaner Production, 19, 667–679.
12. Budny J. 1988. *Uwagi i wnioski końcowe dotyczące: Definicja i ogólna metodyka wyznaczania wskaźnika zużycia energii w przemyśle mleczarskim*. Zeszyt metodyczny „Problemy gospodarki energią w przemyśle mleczarskim”. Zakład Wydawnictw LACPRESS, Warszawa, 83–86.
13. Bujak J. 2008. *Mathematical modeling of a steam boiler room to research thermal efficiency*. Energy, 33, 1779–1787.
14. Burnett R.D., Hansen D.R. 2008. *Ecoefficiency: Defining a role for environmental cost management*. Accounting, Organizations and Society, 33, 551–581.
15. Calderan R., Spiga M., Vestrucci P. 1992. *Energy modeling of a cogeneration system for a food industry*. Energy, 17, 6, 609–616.
16. Cameron I.T., Ingram G.D. 2008. *A survey of industrial process modelling across the product and process lifecycle*. Computers and Chemical Engineering, 32, 420–438.
17. Diakun J., Mierzejewska S., Kukielka K. 2012. *Równanie regresji zapotrzebowania energetycznego w procesie mycia rurociągu metodą CIP*. Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego, 1(1), 5–8.
18. Dunn R.F., Bush G.E. 2001. *Using process integration technology for cleaner production*. Journal of Cleaner Production, 9, 1–23.
19. Donsi F., Ferrari G., Pataro G. 2010. *Applications of Pulsed Electric Field Treatments for the Enhancement of Mass Transfer from Vegetable Tissue*. Food Engineering Reviews, 2(2), 109–130.
20. Drózdź B. 2010. *Effectiveness of electrical energy consumption in milling plant*. Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Agriculture (Agricultural and Forest Engineering). Warsaw, 56, 57–65.
21. Drózdź B., Wojdalski J. 2002. *Effect of various factors on water consumption in oil seed processing plants*. Annals of Warsaw Agricultural University. Agriculture (Agricultural Engineering). Warsaw, 42, 59–67.
22. Drózdź B., Wojdalski J. 2003. *Uwarunkowania gospodarki energetycznej zakładów przetwórstwa nasion oleistych*. Inżynieria Rolnicza, 8 (50), 117–124.
23. Drózdź B., Wojdalski J. 2004. *Selected aspects of energy consumption in poultry processing plants*. Annals of Warsaw Agricultural University. Agriculture (Agricultural Engineering), Warsaw, 45, 69–74.
24. Drózdź B., Wojdalski J., Gołda M., Grzeszek R. 2002. *Uwarunkowania gospodarki energetycznej zakładów produkcji napojów bezalkoholowych*. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych. PAN, Warszawa, 486, 629–634.
25. Dżiki D., Laskowski J. 2005. *Influence of selected factors on wheat grinding energy requirements*. TEKA Kom. Mot. Energ. Roln., 5, 56–64.
26. Dżiki D., Laskowski J. 2006. *Influence of wheat grain mechanical properties on grinding energy requirements*. TEKA Kom. Mot. Energ. Roln., 6A, 45–52.
27. European Commission. 2006. *Integrated Pollution Prevention and Control*. Reference Document on Best Available Techniques in the Food, Drink and Milk Industries, 97–99, 138–139.
28. Flizikowski J., Bieliński K., Bieliński M. 1994. *Podwyższanie energetycznej efektywności wielotarczowego rozdrabniania nasion zbóż na paszę*. Wydawnictwo ATR-OPO, Bydgoszcz.
29. Fritzson A., Berntsson Th. 2006. *Energy efficiency in the slaughter and meat processing industry – opportunities for improvements in future energy markets*. Journal of Food Engineering, 77, 792–802.
30. Fryer P.J., Robbins P.T. 2005. *Heat transfer in food processing: ensuring product quality and safety*. Applied Thermal Engineering, 25, 2499–2510.
31. Fumo N., Mago P.J., Chamra L.M. 2009. *Analysis of cooling, heating, and power systems based on site energy consumption*. Applied Energy, 86, 928–932.
32. Gogate P.R. 2011. *Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing*. Food and Bioprocess Technology, 6 (4), 996–1011.
33. Grochowicz J., Walczyński S. 2004. *The effect of some technological factors on the consumption energy at mixing granular materials*. TEKA Kom. Mot. i Energ. Roln., 4, 70–75.
34. Grochowicz J., Zawisłak K. 2012. *Energooszczędne przetwarzania ziarna kukurydzy*. Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego, 2 (2), 15–18.

35. Grzybek A. 2003. *Wpływ wybranych technologii na środowisko i energochłonność przetwórstwa owocowo-warzywnego*. KTR, PTIR, IBMER, Warszawa, 2(44), 56–153.
36. Herring H. 2006. *Energy efficiency – a critical view*. *Energy*, 31, 10–20.
37. Hufendiek K., Klemeš J. 1997. *Integracja procesów produkcyjnych browaru metodą Pinch Point Technology*. *Gospodarka Paliwami i Energią*, 9, 22–25.
38. Iciek J., Rogacki G., Wawrzyniak P., Zbiciński I., Żyła R. 1988. *Model matematyczny gospodarki cieplnej cukrowni*. *Gazeta Cukrownicza*, 10, 181–182.
39. Iwaniak A. 1999. *Energochłonność produkcji hydrolizatów skrobiowych*. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1/2, 40–45.
40. Jebaraj S., Iniyar S. 2006. *A review of energy models*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10, 281–311.
41. Jekayinfa S.O., Bamgboye A.I. 2006. *Estimating energy requirement in cashew (Anacardium occidentale L.) nut processing operations*. *Energy*, 31, 1305–1320.
42. Jekayinfa S.O., Bamgboye A.I. 2007. *Development of equations for estimating energy requirements in palm-kernel oil processing operations*. *Journal of Food Engineering*, 79, 322–329.
43. Jin T.X., Xu L. 2006. *Numerical study on the performance of vacuum cooler and evaporation-boiling phenomena during vacuum cooling of cooked meat*. *Energy Conversion and Management*, 47, 1830–1842.
44. Kaleta A., Wojdalski J. (red.) 2008. *Przetwórstwo rolno-spożywcze. Wybrane zagadnienia inżynierijno-produkcyjne i energetyczne*. Wyd. SGGW, Warszawa, 182–192.
45. Kaminski J., Leduc G. 2010. *Energy efficiency improvement options for the EU food industry*. *Polityka Energetyczna*, 13, 81–97.
46. Kannan R., Boie W. 2003. *Energy management practices in SME—case study of a bakery in Germany*. *Energy Conversion and Management*, 44, 945–959.
47. Kiryluk J. 2001. *Uwarunkowania racjonalnej gospodarki energią w zakładach młynarskich*. *Rozprawy Naukowe, Zeszyt 316. Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu*. Poznań.
48. Klemeš J., Smith R., Kim J.-K. 2008. *Handbook of water and energy management in food processing*. CRC Press – Cambridge Woodhead Publishing LTD.
49. Korpysz K., Roszkowski H., Wojdalski J. 2007. *Energetyczne aspekty gniecenia ziarna jęczmienia*. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 39–43.
50. Kowalczyk R. 2006. *Analiza technologiczno-techniczna produkcji zagęszczonego soku jabłkowego*. Wyd. SGGW, Warszawa, 42–82.
51. Kowalczyk R., Netter J. 2008. *Nowe spojrzenie na zużycie czynników energetycznych w zakładzie przemysłu spożywczego*. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 45–47.
52. Krzysztofik B. 2005. *Nakłady energetyczne poniesione na produkcję pieczywa w wybranej piekarni*. *Inżynieria Rolnicza*, 10, 227–233.
53. Krzysztofik B., Łapczyńska-Kordon B. 2008. *Analiza energochłonności wybranych produktów piekarskich*. *Inżynieria Rolnicza*, 1, 209–215.
54. Kuśińska E., Zawislak K., Sobczak P. 2008. *Energy consumption of maize grain crushing depending on moisture content*. *TEKA Kom. Mot. Energ. Roln.*, 8, 129–134.
55. Laudański A. 2007. *Analiza energochłonności produkcji cukru z krajanki buraczanej*. Praca doktorska. WIP, SGGW, Warszawa.
56. Le-bail A., Dessev T., Jury V., Zuniga R., Park T., Pitroff M. 2010. *Energy demand for selected bread making processes: Conventional versus part baked frozen technologies*. *Journal of Food Engineering*, 96, 510–519.
57. Ledakowicz S., Krzystek L. 2005. *Wykorzystanie fermentacji metanowej w utylizacji odpadów przemysłu rolno-spożywczego*. *Biotechnologia*, 3 (70), 165–183.
58. Lipski R., Orliński S., Tokarski M. 2006. *Energetyczne wykorzystanie biomasy na przykładzie kotłowni opalanej słomą we Fromborku*. *MOTROL Mot. i Energ. Roln.*, 8A, 202–209.
59. Mahlia T.M.I., Masjuki H.H., Choudhury I.A. 2002. *Theory of energy efficiency standards and labels*. *Energy Conversion & Management*, 43, 743–761.
60. Marechal F., Kalitventzeff B. 1996. *Targeting the minimum cost of energy requirements: A new graphical technique for evaluating the integration of utility system*. *Computers Chem. Engng.*, 20, 225–230.
61. Markis T., Paravantis J.A. 2007. *Energy conservation in small enterprises*. *Energy and Buildings*, 39, 404–415.
62. Marks N., Sobol Z., Baran D. 2006. *Wpływ wilgotności na energochłonność procesu rozdrabniania ziarna zbóż*. *Inżynieria Rolnicza*, 3 (78), 281–288.
63. Maryniak L. 2011. *Kogeneracja w przemyśle spożywczym*. *Power Industry–Energetyka i Przemysł*. Dodatek Konferencyjny, 2, 28–43: [http://www.apbiznes.pl/wpcontent/uploads/2011/11/2011\\_2\\_pi.pdf](http://www.apbiznes.pl/wpcontent/uploads/2011/11/2011_2_pi.pdf).
64. *Metoda obliczania wskaźników jednostkowego zużycia paliw i energii w przemyśle spożywczym*. Zeszyty metodyczne nr 69. GUS, Warszawa, 1986.
65. *Metoda obliczania wskaźników jednostkowego zużycia paliw i energii w produkcji rolniczej i przetwórstwie rolno-spożywczym*. Zeszyty Metodyczne nr 71 GUS, Warszawa 1987.
66. Mitrus M. 2005. *Changes of specific mechanical energy during extrusion cooking of thermoplastic starch*. *TEKA Kom. Mot. Energ. Roln.*, 5, 152–157.
67. Muller D.C.A., Marechal F.M.A., Wolewinski T., Roux P.J. 2007. *An energy management method for the food industry*. *Applied Thermal Engineering*, 27, 2677–2686.
68. Myczko A., Myczko R., Kołodziejczyk T., Golomowska R., Lenarczyk J., Janas Z., Kliber A., Karłowski J., Dolska M. 2011. *Budowa i eksploatacja biogazowni rolniczych*. Instytut Technologiczno-Przyrodniczy. Warszawa–Poznań, 57–73. ISBN 978–83–62416–23–3
69. Neryng A., Wojdalski J., Budny J., Krasowski E. 1990. *Energia i woda w przemyśle rolno-spożywczym*. WNT, Warszawa, 103–106, 189–194.
70. Niedziółka I., Szymanek M., Zuchniarz A. 2006. *Energetic evaluation of postharvest corn mass for heating purposes*. *TEKA Kom. Mot. Energ. Roln.*, 6A, 145–150.
71. Niedziółka I., Zuchniarz A. 2006. *Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenia roślinnego*. *MOTROL*, 8A, 232–237.
72. Niemiec A., Romański L., Stopa R. 2005. *Energochłonność jedno i dwuetapowego rozdrabniania ziarna w gniotowniku*. *Inżynieria Rolnicza*, 11 (71), 333–340.
73. Opielak M. 1997. *Wybrane zagadnienia rozdrabniania materiałów w przemyśle rolno-spożywczym*. *Rozprawy*

- Naukowe Akademii Rolniczej w Lublinie, 200. Wydawnictwo AR w Lublinie.
74. Panasiewicz M., Zawiaślak K., Sobczak P., Mazur J., Sosińska E. 2012. *Wybrane zabiegi obróbki wstępnej nasion rzepaku i ich wpływ na efektywność wytłaczania*. Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego, 1(1), 27–30.
75. Panno D., Messineo A., Dispenza A. 2007. *Cogeneration plant in a pasta factory: Energy saving and environmental benefit*. Energy, 32, 746–754.
76. Patterson M.G. 1996. *What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues*. Energy Policy, 24 (5), 377–390.
77. Pawełas A. 2010. *Efektywność energetyczna na przykładzie browaru*. Agro Przemysł, 3–4, 44–47.
78. Phylipsen G.J.M., Blok K., Worrell E. 1997. *International comparisons of energy efficiency – Methodologies for the manufacturing industry*. Energy Policy, 25, 715–725.
79. Piacentino A., Cardona F. 2008. *EABOT – Energetic analysis as a basis for robust optimization of trigeneration systems by linear programming*. Energy Conversion and Management, 49, 3006–3016.
80. Piechocki J. 1997. *Metoda badania energochłonności przetwórstwa mleka*. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczo-Technicznej w Olsztynie, Olsztyn.
81. Prasad P., Pagan R., Kauter M., Price N. 2004. *Eco-efficiency for the Dairy Processing Industry*. Environmental Management Centre, The University of Queensland, St Lucia, 43–48, 57–66.
82. Ramachandra T.V., Subramanian D.K. 1993. *Analysis of energy utilization in the grain mill sector in Karnataka*. Energy Policy, 7, 644–655.
83. Ramirez C.A., Patel M., Blok K. 2006. *How much energy to process one pound of meat? A comparison of energy use and specific energy consumption in the meat industry of four European countries*. Energy, 31, 2047–2063.
84. Rosiński M., Furtak L., Łuksa A., Stępień A. 2006. *Wykorzystanie olejów roślinnych i urządzeń do ich spalania w procesach suszarniczych*. MOTROL, 8A, 243–250.
85. Salta M., Polatidis H., Haralambopoulos D. 2009. *Energy use in the Greek manufacturing sector: A methodological framework based on physical indicators with aggregation and decomposition analysis*. Energy, 34, 90–111.
86. Savoie R., Lanoisellé J.-L., Vorobiev E. 2012. *Mechanical Continuous Oil Expression from Oilseeds: A Review*. Food and Bioprocess Technology. Doi: 10.1007/s 11947–012–0947–x.
87. Simpson R., Cortés C., Teixeira A. 2006. *Energy consumption in batch thermal processing: model development and validation*. Journal of Food Engineering, 73, 217–224.
88. Singh R.P. 1986. *Energy accounting of food processing operations (in Energy in Food Processing*. Elsevier. Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo, 26).
89. Skorek J., Szmolke N., Ulbrich R. 2000. *Metoda oceny gospodarki energetycznej w przemyśle spożywczym w warunkach niepewności danych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej. Seria: Mechanika, z.61(256), 301–308.
90. Skowroński P. 1994. *Modelowanie wielowariantowe systemów energotechnologicznych*. Gospodarka Paliwami i Energią, 12, 6–8.
91. Sogut Z., Ilmen N., Oktay Z. 2010. *Energetic and exergetic performance evaluation of the quadruple-effect evaporator unit in tomato paste production*. Energy, 35, 3821–3826.
92. Sondberg P., Söderström M. 2003. *Industrial energy efficiency: the Reed for investment decision support from a manager perspective*. Energy Policy, 31 (15), 1623–1634.
93. Sridhar B. S., Manohar B. 2001. *Optimization of the continuously extruded unleavened flat bread (chapati) process*. European Food Research and Technology, 4 (212), 477–486.
94. Swords B., Coyle E., Norton B. 2008. *An enterprise energy-information system*. Applied Energy, 85, 61–69.
95. Szargut J. 1987. *Analiza egzergochłonności skumulowanej*. Archiwum Energetyki, 3–4, 227–236.
96. Tassou S.A., Chaer I., Sugiarta N., Ge Y.-T., Marriott D. 2007. *Application of tri-generation systems to the food retail industry*. Energy Conversion and Management, 48, 2988–2995.
97. Thompson H. 2006. *The applied theory of energy substitution in production*. Energy Economics, 28, 410–425.
98. Tkacz K., Budny J., Borowski J. 2000. *Charakterystyka energetyczna obróbki cieplnej mięsa wołowego*. Inżynieria Rolnicza, 5 (16), 241–248.
99. Trojanowska M. 1993. *Nakłady materiałowo-energetyczne na produkcję mąki*. Zeszyty Naukowe AR w Krakowie 284, z. 12, 35–44.
100. Urbaniec K. 1994. *Nowe energooszczędne technologie w procesach przemysłowych*. Materiały II Konferencji „Racjonalizacja użytkowania energii i środowiska”. Szczyrk 17–19 października, 125–136.
101. Urbaniec K., Zalewski P. 2000. *Projektowanie usprawnień gospodarki energetycznej cukrowni przy użyciu metod integracji procesów*. Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej. Seria: Mechanika, z.61(256), 331–338.
102. Utlu Z., Hepbasli A. 2006. *Estimating the energy and exergy utilization efficiencies for the residential-commercial sector: an application*. Energy Policy, 34, 1097–1105.
103. Vogt Y. 2004. *Top-down energy modeling*. Strategic Planning for Energy and the Environment, 24 (1), 66–80.
104. Waheed M.A., Jekayinfa S.O., Ojediran J.O., Imeokparia O.E. 2008. *Energetic analysis of fruit juice processing operations in Nigeria*. Energy, 33, 35–45.
105. Wilhite H. 2008. *New thinking on the agentive relationship between end-use technologies and energy-using practices*. Energy Efficiency, 2(1), 121–130.
106. Wang, L. J. (editor). 2008. *Energy Efficiency and Management in Food Processing Facilities*. CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, FL, USA. ISBN: 1420063383.
107. Wojdalski J. 1991. *Wpływ wybranych czynników na energochłonność produkcji mleczarskiej*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
108. Wojdalski J. 1992. *Energetyczne aspekty produkcji pieczywa*. Gospodarka Paliwami i Energią 11, 14–17.
109. Wojdalski J., Domagała A., Kaleta A., Janus P. 1998. *Energia i jej użytkowanie w przemyśle rolno-spożywczym (praca pod redakcją naukową J. Wojdalskiego)*. Wyd. SGGW, Warszawa, 10–11, 171–186, 226–229.
110. Wojdalski J., Dróżdź B. 2006. *Podstawy analizy energochłonności produkcji zakładów przemysłu rolno-spożywczego*. MOTROL, Mot. i Energ. Roln. Tom 8A. Lublin, 294–304.
111. Wojdalski J., Dróżdź B., Brzeziński H. 2007a. *Efektywność zużycia energii w zakładach piekarskich*. Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego, 1, 53–57.

112. Wojdalski J., Drózd B., Lubach M. 2007b. *Factors influencing energy consumption in fruit and vegetable processing plants*. TEKA Kom. Mot. Energ. Roln. – OL PAN, 7, 277–285.
113. Wojdalski J., Drózd B., Lubach M. 2007c. *Factors influencing electrical energy consumption in fruit and vegetable processing plants*. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences. Formerly Acta Alimentaria Polonica. Olsztyn, 57, 2(A), 195–199.
114. Wojdalski J., Drózd B., Chamera A., 2008a. *Energetyczne aspekty pracy pieców piekarskich*. Inżynieria Rolnicza, 1(99).
115. Wojdalski J., Drózd B., Brocki H. 2008b. *Effectiveness of electrical energy and water consumption in a small-size dairy processing plant*. TEKA Kom. Mot. Energ. Roln. – OL PAN, 8, 303–309.
116. Wojdalski J., Drózd B., Rauzer A. 2008c. *Analiza zużycia energii i wody w zakładzie przetwórstwa zielarskiego*. Inżynieria Rolnicza, Kraków, 1 (99), 419–424.
117. WS Atkins International. 1998. *Ochrona środowiska w przemyśle rolno-spożywczym, Standardy środowiskowe*. FAPA, Warszawa.
118. *Wytyczne ustalenia i stosowania państwowych normatywów zużycia paliw i energii oraz wskaźników jednostkowej energochłonności*. 1983. GIGE, Warszawa
119. Xiao-Ping J., Fanga W., Shu-Guanga X., Xin-Suna T., Fang-Yu H. 2008. *Minimum energy consumption process synthesis for energy saving*. Resources, Conservation and Recycling, 52, 1000–1005.
120. Xu T., Flapper J. 2009. *Energy use and implications for efficiency strategies in global fluid-milk processing industry*. Energy Policy, 37, 5334–5341.
121. Xu T., Flapper J., Kramer K.J. 2009. *Characterization of energy use and performance of global cheese processing*. Energy, 34, 1993–2000.
122. Zawiślak K. 2001. *Wpływ wilgotności surowca na energochłonność procesu rozdrabniania*. Inżynieria Rolnicza, 2, 389–392.
123. Ziębik A. 2001. *Process and system analysis in thermal engineering*. Energy, 26, 1145–1157.
124. Zhang J., Datta A.K. 2006. *Mathematical modeling of bread baking process*. Journal of Food Engineering 75, 78–89.
125. Zhou P., Ang B.W. Poh K.L. 2006. *Decision analysis in energy and environmental modeling: An update*. Energy, 31, 2268–2286.

**Janusz Wojdalski, Bogdan Drózd**

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie  
Katedra Organizacji i Inżynierii Produkcji  
ul. Nowoursynowska 164; 02-787 Warszawa  
e-mail: [janusz\\_wojdalski@sggw.pl](mailto:janusz_wojdalski@sggw.pl)  
e-mail: [bogdan\\_drozd@sggw.pl](mailto:bogdan_drozd@sggw.pl)  
skype: januszwojdalski

pobrano z [www.ips.wm.tu.koszalin.pl](http://www.ips.wm.tu.koszalin.pl)