

**WARTOŚĆ ODPADÓW DRZEWNYCH  
JAKO FUNKCJA KRYTERIUM OPŁACALNOŚCI  
PRZEROBU NA ENERGIĘ**

Elżbieta Mikołajczak

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

**Abstrakt.** W opracowaniu wskazano metodę umożliwiającą wyznaczenie struktury zagospodarowania odpadów drzewnych na cele energetyczne w obrębie podmiotu przerabiającego drewno. Proponowana formuła, umożliwiająca wycenę różnych rodzajów drewna kierowanego do spalania, może znaleźć zastosowanie również w makroskali gospodarczej.

**Słowa kluczowe:** odpady drzewne, przerób na energię, wartość odpadów drzewnych

**WPROWADZENIE**

W latach dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia – okresie obfitości taniej energii, odpady drewna niektórych frakcji, np.: trociny i kora, posiadały minimalną wartość, a często stanowiły wręcz obciążenie związane z ich utylizacją. Przystąpienie Polski do struktur europejskich diametralnie zmieniło sytuację na rynku tych odpadów. Konieczność wypełnienia zobowiązań unijnych oraz wzrost cen energii spowodował zwiększenie opłacalności spalania drewna, a szczególnie odpadów z jego przerobu. Tym samym ujawniła się rzeczywista, aktualna wartość drewna w przerobie na energię.

**CIEPŁO SPALANIA I WARTOŚĆ OPAŁOWA DREWNA**

Drewno charakteryzuje określona wartość opałowa ( $Q_d$ ), tj. jednostkowa ilość ciepła uzyskana w wyniku spalania w normalnych warunkach 1kg (1 t, 1 m<sup>3</sup>) danego sorty-

mentu drewna, względnie jego odpadu, przy czym para wodna przedostaje się na zewnątrz i nie oddaje ciepła utajonego. Wartość opałowa jest niższa od ciepła spalania ( $W_g$ ), które definiuje się jako ilość kcal, która powstaje w warunkach kalorymetrycznych przy spalaniu 1 kg paliwa i ochłodzeniu spalin do temperatury otoczenia. Wytworzona w procesie spalania para wodna skrapla się i oddaje ciepło utajone. Różnicę pomiędzy ciepłem spalania a wartością opałową ( $W_g - Q_d$ ) stanowi więc ilość ciepła, zawarta w parze wodnej.

Wartość opałowa drewna i jego odpadów zależy od wilgotności materiału dostarczanego do spalania. W świeżo ściętym lub mokrym drewnie wyróżnia się [Krzysik 1978]:

- 1) wodę wolną, która wypełnia cewki i naczynia (pory mikroskopowe),
- 2) wodę związaną (imbibicyjną, higroskopijną), która nasycza błonę komórkową i wypełnia przestrzenie międzymicelarne (pory submikroskopowe) błony komórkowej,
- 3) wodę konstytucyjną, która wchodzi w skład występujących w drewnie związków i której nie można usunąć metodami fizycznymi (np. przez suszenie drewna).

Świeżo ścięte drewno zawsze zawiera wodę wolną i wodę związaną. W drewnie spławianym i składowanym w wodzie ilość wody wolnej jest większa niż w drewnie świeżo ściętym. W drewnie powietrznosuchym nie ma wody wolnej. Zawartość wody w drewnie jako stosunek jej masy do masy drewna określa wilgotność drewna (g/g, %). W zależności od przyjętego poziomu odniesienia wyróżnia się wilgotność bezwzględną i wilgotność względną.

Wilgotność bezwzględną definiuje się jako stosunek masy wody zawartej w drewnie do masy drewna całkowicie suchego (1), natomiast wilgotność względną określa się jako stosunek masy wody zawartej w drewnie do masy drewna wilgotnego (2).

$$w_0 = \frac{G_w - G_0}{G_0} \text{ (g/g)} \quad w_0 = \frac{G_w - G_0}{G_0} \times 100\% \text{ (%)}$$

$$w_w = \frac{G_w - G_0}{G_w} \text{ (g/g)} \quad w_w = \frac{G_w - G_0}{G_w} \times 100\% \text{ (%)}$$

gdzie:

- $w_0$  – bezwzględna wilgotność drewna (g/g, jednostki niemianowane) lub (%),
- $w_w$  – względna wilgotność drewna (g/g, jednostki niemianowane) lub (%),
- $G_w$  – masa próbki wilgotnej (g),
- $G_0$  – masa próbki całkowicie suchej (g).

W drzewnictwie stosuje się na ogół wilgotność bezwzględną, nazywając ją w uproszczeniu „wilgotnością”. Natomiast w zagadnieniach dotyczących cieplnych właściwości drewna dominuje wilgotność względną, co każdorazowo należy zaznaczyć. Często zachodzi więc konieczność przeliczania wilgotności względnej na bezwzględną, co umożliwiają następujące równania:

$$w_0 = \frac{w_w}{1 - w_w} \quad w_w = \frac{w_0}{1 + w_0}$$

W zależności od poziomu wilgotności jest konieczne odparowanie z drewna różnej ilości zawartej w nim wody, co wiąże się z odpowiednim wydatkiem energetycznym (GJ/t). Wartość opałow drewna odpadowego w przerobie na energię, przy wilgotności do 9%, wynosi około 15 (GJ/t), natomiast węgla groszku 19-20 (GJ/t). Przyjmuje się optymistycznie, że wartość opałow drewna suchego (9-10%) stanowi 0,75 wartości opałow węgla groszku [Bogusz i in. 1991].

Ciepło spalania, a w konsekwencji również wartość opałow paliwa, zależy od jego składu chemicznego. W paliwie wyróżnia się substancję palną, którą tworzą węgiel (C), wodór (H) i inne mniej ważne składniki oraz substancję niepalną, złożoną z wody i składników mineralnych. Znając elementarny skład chemiczny paliwa oraz ciepło spalania jego składników, można określić ciepło spalania według wzoru Dulonga (formuła związkowa):

$$W_g = 8100C + 34000\left(H + \frac{O}{8}\right) + 2500S \quad (\text{kcal/kg}) \quad (4)$$

gdzie:

$W_g$  – ciepło spalania drewna suchego (kcal/kg),  
C, H, O, S – udziały węgla, wodoru, tlenu i siarki (kg/kg paliwa).

Współczynniki przy poszczególnych symbolach odpowiadają w zaokrągleniu ciepłu spalania poszczególnych składników paliwa.

Po wyrażeniu poszczególnych wartości w procentach, wzór (4) przybiera postać:

$$W_g = 81C + 340\left(H + \frac{O}{8}\right) + 25S \quad (\text{kcal/kg}) \quad (5)$$

Wzór Dulonga można zastosować do określenia ciepła spalania drewna, uwzględniając udział poszczególnych pierwiastków w jego budowie: węgla – 50%, tlenu – 43%, wodoru – 6,1%, azotu od 0,04 do 0,26% oraz związków mineralnych od 0,30 do 1,20%. W powyższej formule (5) pomija się wówczas ostatni człon, z uwagi na fakt, iż drewno nie zawiera siarki, natomiast udział azotu dolicza się do tlenu lub pomija. Wartość ciepła spalania obliczona za pomocą wzoru Dulonga jest o 10 do 15% niższa od wartości wyznaczonej metodą kalorymetryczną, ponieważ pierwiastki wchodzące w skład drewna tworzą skomplikowane związki chemiczne, czego formuła ta nie uwzględnia.

Znajomość ciepła spalania umożliwia wyznaczenie wartości opałow drewna suchego według następującego wzoru [Krzysik 1978]:

$$Q_{ds} = W_g - (600 \times 9h) \quad (\text{kcal/kg}) \quad (6)$$

gdzie:

$Q_{ds}$  – wartość opałow drewna suchego (kcal/kg),  
h – zawartość wodoru wyrażona wagowo.

Założenia przyjęte we wzorze:

- 1) utajone ciepło skraplania wynosi 600 kcal/1 kg pary wodnej,
- 2) do zawartej w drewnie wilgoci dolicza się wodę chemiczną, powstającą ze spalania wodoru (z 1 kg wodoru powstaje 9 kg wody).

Jeżeli udział wodoru zostanie wyrażony procentowo, wzór (6) przyjmie postać:

$$Q_{ds} = W_g - \left( 600 \times \frac{9h}{100} \right) \text{ (kcal/kg)} \quad (7)$$

$$Q_{ds} = W_g - (6 \times 9h) \text{ (kcal/kg)} \quad (8)$$

Zawartość substancji palnej w drewnie zmniejsza obecność wody. Wraz z parą wodną ulatnia się bowiem określona ilość ciepła (600 kcal/1 kg pary wodnej) potrzebna do odparowania wody.

Ciepło spalania drewna wilgotnego o wilgotności względnej  $w_w$  wynosi zatem:

$$W'_g = W_g(1 - w_w) \text{ (kcal/kg)} \quad (9)$$

gdzie:

$W'_g$  – ciepło spalania drewna wilgotnego (kcal/kg).

Zarówno ciepło spalania drewna wilgotnego, jak i zawartość wodoru wyrażona wagowo w stosunku do ciężaru drewna wilgotnego, są mniejsze od swoich odpowiedników dotyczących drewna suchego, co przedstawiają zależności:

$$W'_g < W_g \quad (10)$$

$$h' < h \quad (11)$$

$$h' = h(1 - w_w) \quad (12)$$

Wartość opałową drewna wilgotnego, z uwzględnieniem, że ciepło parowania odprowadzone z parą wodną wynosi  $600(w_w + 9h')$  kcal, można wyrazić wzorem:

$$Q_{dw} = W'_g - 600(w_w + 9h') \text{ (kcal/kg)} \quad (13)$$

który, po podstawieniu równań (9) i (12), przyjmie postać:

$$Q_{dw} = W_g(1 - w_w) - 600[w_w + 9h(1 - w_w)] \text{ (kcal/kg)} \quad (14)$$

gdzie:

$Q_{dw}$  – wartość opałowa drewna o wilgotności względnej  $w_w$  (kcal/kg),

Podanie wilgotności drewna jako bezwzględnej wymaga przekształceń wzoru (14) z zastosowaniem zależności (3):

$$Q_{dw} = W_g \left( 1 - \frac{w_0}{1 + w_0} \right) - 600 \left[ \frac{w_0}{1 + w_0} + 9h \left( 1 - \frac{w_0}{1 + w_0} \right) \right] \text{ (kcal/kg)} \quad (15)$$

$$Q_{dw} = W_g \frac{1 + w_0 - w_0}{1 + w_0} - 600 \left[ \frac{w_0}{1 + w_0} + 9h \frac{1 + w_0 - w_0}{1 + w_0} \right] \text{ (kcal/kg)} \quad (16)$$

$$Q_{dw} = \frac{1}{1 + w_0} [W_g - 600(w_0 + 9h)] \text{ (kcal/kg)} \quad (17)$$

Ciepło spalania oraz zawartość wodoru w drewnie suchym ulega nieznacznym wahaniom i została wyznaczona przez różnych badaczy zagadnienia z niewielkimi odchyleniami. Podstawiając do wzoru (17) uśrednioną wartość ciepła spalania, dla sosny  $W_g = 4982$  kcal/kg oraz zawartość wodoru  $h = 0,06$  kg/kg (6%), można w przybliżeniu wyznaczyć wartość opałową drewna sosny o danej wilgotności  $w_0$ :

$$Q_{dw} = \frac{1}{1+w_0} [4982 - 600(w_0 + 9 \times 0,06)] \text{ (kcal/kg)} \quad (18)$$

$$Q_{dw} = \frac{1}{1+w_0} (4982 - 600w_0 - 324) \text{ (kcal/kg)} \quad (19)$$

w przybliżeniu:

$$Q_{dw} = \frac{4660 - 600w_0}{1+w_0} \text{ (kcal/kg)} \quad (20)$$

$$Q_{dw} = \frac{19,5 - 2,5w_0}{1+w_0} \text{ (MJ/kg)} = \text{(GJ/t)} \quad (21)$$

oraz wyrażoną za pomocą wilgotności względnej:

$$Q_{dw} = 4660 - 5260w_w \text{ (kcal/kg)} \quad (22)$$

$$Q_{dw} = 19,5 - 22w_w \text{ (MJ/kg)} = \text{(GJ/t)} \quad (23)$$

$$1 \text{ kcal} = 4,1868 \text{ J}$$

Do wyznaczenia wartości opałowej drewna wilgotnego  $Q_{dw}$  o wilgotności względnej  $w_w$ , przy danej wartości opałowej drewna suchego  $Q_{ds}$ , można stosować w praktyce również dwa następujące wzory [Krzysik 1978]:

$$Q_{dw} = \frac{100 - w_w}{100} \times Q_{ds} - 6w_w \text{ (kcal/kg)} \quad (24)$$

lub w przybliżeniu:

$$Q_{dw} = Q_{ds} - 50,56w_w \text{ (kcal/kg)} \quad (25)$$

## WARTOŚĆ DREWNA I ODPADÓW DRZEWNYCH W PRZEROBIE NA ENERGIĘ

Proponowana metoda rachunku wyceny wartości drewna i odpadów drzewnych w przerobie na energię umożliwi ustalenie granicznej do zaakceptowania przez zakład energetyczny ceny jego zakupu, a także będzie podstawą doboru struktury zagospodarowania odpadów drzewnych przez ich dysponentów.

Jednostkowy zysk, jaki osiąga się przetwarzając drewno i odpady drzewne na energię elektryczną, można wyrazić za pomocą równań:

$$Z_j = P_j - K_j - p (P_j - K_j) \text{ (zł/GJ)} \quad (26)$$

$$Z_j = c_j m_j \text{ (zł/GJ)} \quad (27)$$

gdzie:

- $P_j$  – przychód jednostkowy ze sprzedaży energii (względnie oszczędności wynikające z zastąpienia innego paliwa tymi odpadami) (zł/GJ),
- $K_j$  – koszt wytworzenia jednostki energii (zł/GJ),
- $p$  – stopa podatku dochodowego (CIT),
- $c_j$  – cena jednostki energii (zł/GJ),
- $m_j$  – zakładany poziom marży.

Porównując stronami oba równania (26) i (27) otrzymuje się zależność:

$$c_j m_j = P_j - K_j - p (P_j - K_j) \quad (28)$$

$$c_j m_j = (P_j - K_j) (1 - p) \quad \Bigg| : (1 - p) \quad (29)$$

$$\frac{c_j m_j}{1 - p} = P_j - K_j \quad (30)$$

Przychody ze sprzedaży stanowią iloczyn ceny jednostkowej i ilości sprzedanych jednostek energii:  $P_n = c_n n$ , a więc przychód jednostkowy, gdzie  $n = 1$  wyniesie:

$$P_j = c_j \quad (31)$$

Natomiast wyznaczenie kosztu jednostkowego umożliwi następujące równanie:

$$K_j = \frac{k_{jp} + k_{jt} + k_{jmat}}{g Q_{dw}} \text{ (zł/GJ)} \quad (32)$$

gdzie:

- $k_{jp}$  – koszt jednostkowy przerobu danego odpadu na energię wraz z pozostałymi jednostkowymi kosztami operacyjnymi (zł/m<sup>3</sup>),
- $k_{jt}$  – koszt jednostkowy transportu danego odpadu do zakładu energetycznego (zł/m<sup>3</sup>),
- $k_{jmat}$  – koszt jednostki spalane sortymentu odpadów drzewnych  $w_{odp}$  (zł/m<sup>3</sup>),
- $Q_{dw}$  – wartość opałowa spalane sortymentu odpadów drzewnych o danej wilgotności względnej  $w_w$  (GJ/t),
- $g$  – gęstość usypowa spalane sortymentu odpadów drzewnych (t/m<sup>3</sup>).

Podstawienie zależności (31) i (32) do równania (30) i odpowiednie jego przekształcenie prowadzi dalej do wyznaczenia wartości odpadów drzewnych w przerobie na energię  $w_{odp}$  (36). Zakłada się jednocześnie, że przy osiągnięciu założonego poziomu marży  $m_j$ , koszt jednostki spalane sortymentu odpadów  $k_{jmat}$ , stanowi jego wartość  $w_{odp}$ .

$$\frac{c_j m_j}{1 - p} = c_j - \frac{k_{jp} + k_{jt} + w_{odp}}{g Q_{dw}} \quad \Bigg| \times g Q_{dw}, k_{jmat} = w_{odp}, \quad (33)$$

zatem:

$$\frac{c_j m_j g Q_{dw}}{1-p} = c_j g Q_{dw} - k_{jp} - k_{jt} - w_{odp} \quad (34)$$

$$w_{odp} = c_j g Q_{dw} - \frac{c_j m_j g Q_{dw}}{1-p} - k_{jp} - k_{jt} \quad (35)$$

$$w_{odp} = c_j g Q_{dw} \left( 1 - \frac{m_j}{1-p} \right) - k_{jp} - k_{jt} \quad (\text{zł/m}^3) \quad (36)$$

Po zastąpieniu wielkości  $Q_{dw}$  wyznaczoną wcześniej zależnością (23), powyższe równanie przyjmie postać:

$$w_{odp} = c_j g (19,5 - 22w_w) \left( 1 - \frac{m_j}{1-p} \right) - k_{jp} - k_{jt} \quad (\text{zł/m}^3) \quad (37)$$

Uwzględniając to generalne założenie, wartość danego sortymentu odpadów można wycenić według wzoru:

$$w_{ei} = c_{je} g Q_{wi} \left( 1 - \frac{m_j}{1-p} \right) - k_{pi} - k_{ti} \quad (\text{zł/m}^3) \quad (38)$$

lub:

$$w_{ei} = c_{je} g (19,5 - 22w_w) \left( 1 - \frac{m_j}{1-p} \right) - k_{pi} - k_{ti} \quad (\text{zł/m}^3) \quad (39)$$

gdzie:

$W_{ei}$  – wartość drewna odpadowego w postaci handlowej w przerobie na energię w wyniku spalania  $i$ -tego sortymentu ( $\text{zł/m}^3$ ),

$Q_{wi}$  – wartość opałowia  $i$ -tego sortymentu drewna odpadowego o danej wilgotności ( $\text{GJ/t}$ ),

$c_{je}$  – jednostkowa cena energii ( $\text{zł/GJ}$ ),

$w_w$  – wilgotność względna drewna odpadowego,

$i \in \{1, 2, \dots, q\}$  – numer asortymentu drewna odpadowego.

## PODSUMOWANIE

Proponowana metoda wyceny odpadów drzewnych w przerobie na energię umożliwia ustalenie granicznej do zaakceptowania przez zakład energetyczny ceny jego zakupu, a także stanowi podstawę doboru struktury zagospodarowania odpadów drzewnych przez ich dysponentów. Bowiem podstawowym kryterium kształtowania struktury ilościowej zagospodarowania odpadów jest wycena ich jednostkowej wartości z punktu widzenia interesów odbiorcy, który jest gotów zaakceptować osiągnięcie założonego przez przedsiębiorcę poziomu marży w przerobie.

**LITERATURA**

Krzysik F., 1978. Nauka o drewnie. PWN, Warszawa.

Bogusz J., Glijer L., Sujeta W., Świeciak J., 1991. Przem. Drzewn. 1, 91, 23-24.