Stefan Postrzednik
Politechnika Śląska, Instytut Techniki Cieplnej

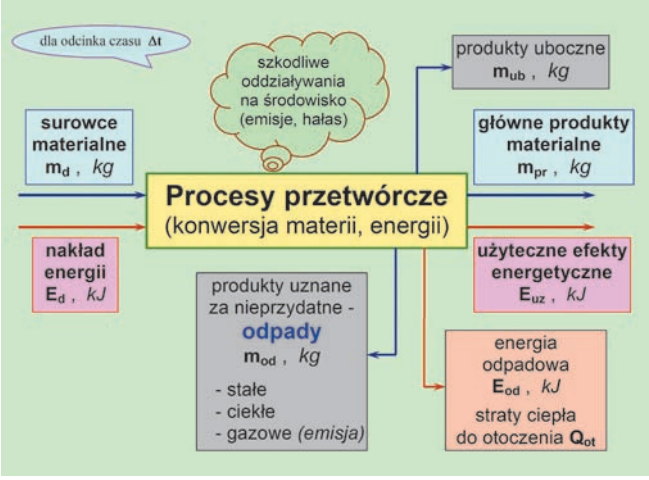
Wartość opałowa jako parametr przydatności energetycznej biomasy

Net calorific value as a parameter of a biomass energy usefulness

Ogólna charakterystyka zagadnienia

Powszechna dostępność źródeł umożliwiających pozyskanie odpowiedniej ilości energii niezbędnej w realizacji procesów przetwórczych odgrywa bardzo ważną rolę w życiu człowieka [3, 8, 14, 15].

Wraz z rozwojem cywilizacji człowiek rozwija różną działalność, realizuje w tym celu odpowiednie procesy przetwórcze, systematycznie dąży do zaspokojenia swoich potrzeb (wynikających z rozwijanego modelu społeczeństwa konsumpcyjnego), co poglądowo w ujęciu ogólnym zostało zilustrowane na rysunku 1.



Rys. 1. Podstawowe elementy realizowanych procesów przetwórczych

W krajach wysoko rozwiniętych udaje się utrzymać zużycie tzw. energii pierwotnej prawie na niezmiennym poziomie (a nawet go zmniejszać) – wszystko głównie dzięki oszczędzaniu energii z jednej strony, a także poprzez zwiększanie sprawności układów przetwarzania energii z drugiej strony; niestety sytuacja ta w innych krajach przedstawia się znacznie gorzej.

Dominującym źródłem energii pierwotnej jest obecnie energia chemiczna paliw kopalnych, którą pozyskuje się najczęściej poprzez ich spalanie [5, 6, 11]. Perspektywy rychłego wyczerpania się zapasów paliw kopalnych, a także obawy o stan środowiska naturalnego człowieka, już od lat dziewięćdziesiątych minionego wieku znacznie zwiększyły zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii, co w konsekwencji doprowadziło do dużego wzrostu ich wykorzystania w wielu krajach.

Technologie odnawialnych źródeł energii rozwinęły się już do takiego stopnia, że mogą konkurować z konwencjonalnymi systemami energetycznymi [1, 3, 7]. Odnawialne źródła energii są najczęściej źródłami lokalnymi; mogą znacząco zwiększyć poziom lokalnego bezpieczeństwa energetycznego i tym samym zmniejszyć zużycie paliw kopalnych, a także wspierać powstawanie nowych miejsc pracy, szczególnie w średnich przedsiębiorstwach oraz promować rozwój regionalny.

Źródłem energii pierwotnej jest w znacznej mierze także biomasa, wykorzystywana głównie jako paliwo w procesie spalania. Generalnie przyjmuje się, że biomasa to cała istniejąca na Ziemi materia organiczna, wszystkie substancje pochodzenia roślinnego oraz zwierzęcego, a ulegające biodegradacji.

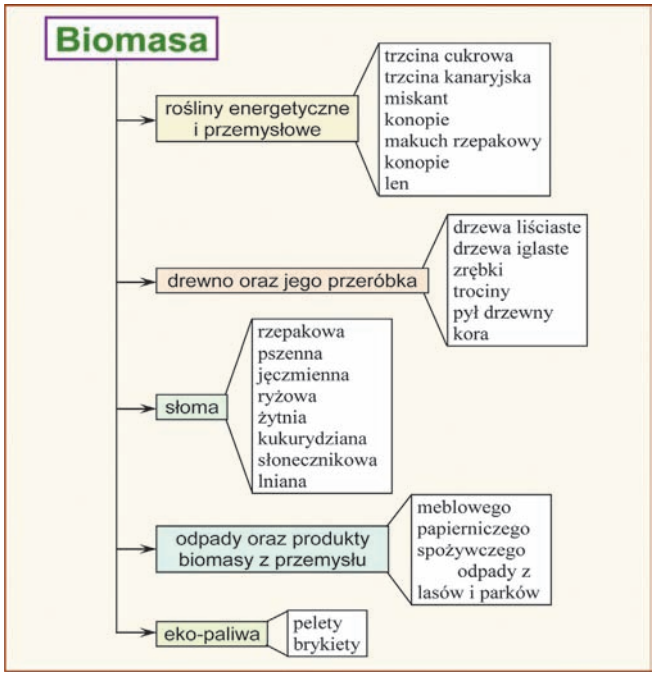
Podstawowy proces wytwarzania biomasy realizowany jest w przyrodzie w sposób prawie spontaniczny, aczkolwiek przy aktywnym współudziale energii słonecznej oraz wilgoci, a przede wszystkim dwutlenku węgla CO_2 zawartego w atmosferze ziemskiej.

Biomasa należy do najstarszych i najszerzej współcześnie wykorzystywanych odnawialnych źródeł energii, a w efekcie stanowi trzecie, co do wielkości na świecie, naturalne źródło energii. Szacuje się, że energia pozyskiwana z biomasy stanowi około 16% światowego zużycia energii, przy czym w krajach rozwijających się udział ten może być znacznie większy, gdyż sięga nawet 38%.

Paliwa alternatywne (biomasa, biopaliwa) są zazwyczaj paliwami gorszej jakości w porównaniu z typowymi paliwami klasycznymi (np. paliwami płynnymi), ponadto także sprawność energetyczna urządzeń energetycznych zasilanych biomasą (biopaliwami) wypada niższa w stosunku do przypadku zasilania dobrej jakości paliwami klasycznymi [5]. Dodatkowo paliwa alternatywne (biomasa) często zawierają znacznie więcej wilgoci aniżeli paliwa klasyczne, co może powodować wystąpienie jeszcze bardziej niekorzystnej sytuacji. Obecność balastu (wilgoci oraz substancji mineralnej) oddziałuje negatywnie na efektywną wartość opałową paliwa, co ostatecznie okazuje się być bardziej istotne w przypadku paliw o niższych wartościach opałowych substancji palnej, np. w procesach utylizacji biomasy.

Istotnym problemem (wadą) jest również stosunkowo niska gęstość (masowa, następnie energetyczna) substancji biomasy, co w efekcie przyczynia się do pojawienia się poważnych trudności oraz wzrostu kosztów transportu, magazynowania, przygotowania i dozowania w układach utylizacji.

Różne typy biomasy – materii pochodzenia roślinnego, powstającej głównie na drodze fotosyntezy – ujęto schematycznie na rysunku 2.



Rys. 2. Podstawowe źródła pozyskiwania biomasy

Jednym z głównych składników biomasy jest między innymi celuloza, o ogólnym wzorze chemicznym $(C_5H_{10}O_5)_n$, gdzie n = 100 - 3000, przy czym drewno zawiera jej ok. 55%, zaś włókna roślinne do 97%.

W biomasie występują także inne pierwiastki, jak: N – azot, Cl – chlor, S – siarka oraz substancja mineralna (A – popiół). Masa drobinowa biomasy zawarta jest w przedziale M ≈ 120 - 160 kg/kmol, a parametr chemicznego zapotrzebowania tlenu szacowany jest jako ChZT ≈ 1,45 kg O_2/kg biomasy [3].

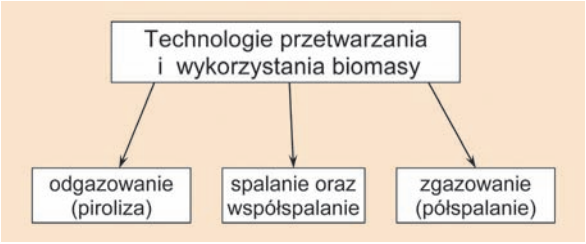
Biomasa to głównie pozostałości i odpady, ale niektóre jej formy są celem produkcji. Specjalnie po to, by pozyskiwać biomasę uprawia się pewne rośliny, np. wierzbę wiciową, rdest czy trzcinę pospolitą, charakteryzujące się dużym przyrostem rocznym i niewielkimi wymaganiami glebowymi.

Wskaźniki masowe pozyskania suchej biomasy kształtują się następująco [1,5,11,18]:

- tereny leśne (3 - 5) Mg/(ha rok),
- plantacje roślin energetycznych (15 - 30) Mg/(ha rok).

We wszelkich rozważaniach należy mieć na uwadze fakt, że istotnym ograniczeniem produkcji biomasy jest wielkość powierzchni terenów pozostających do zagospodarowania w tym zakresie.

Biomasą o dużym znaczeniu technicznym są resztki z produkcji rolnej, pozostałości z leśnictwa, odpady przemysłowe i komunalne. Podstawowe sposoby z zakresu różnych technologii przetwarzania i wykorzystania biomasy zostały zaprezentowane na rysunku 3.



Rys. 3. Główne sposoby przetwarzania i wykorzystania biomasy

Szacuje się, że techniczny potencjał energetyczny biomasy (biopaliw stałych) w Polsce, możliwy do komercyjnego wykorzystania na cele energetyczne, wynosi ok. 407,5 PJ w skali roku [6]. Składają się na niego głównie nadwyżki masy odpadowej pozyskiwane w: rolnictwie (ok. 195 PJ), leśnictwie (ok. 101 PJ), sadownictwie (ok. 57,6 PJ) i przemyśle drzewnym (odpady drzewne, ok. 53,9 PJ).

Paliwa alternatywne (np. biomasa) są zazwyczaj paliwami gorszej jakości w porównaniu z typowymi paliwami klasycznymi; często zawierają znacznie więcej wilgoci aniżeli paliwa klasyczne [1, 7].

Wartość opałowa biomasy (jako podstawowy parametr energetyczny paliw) jest więc niższa od wartości opałowej paliw klasycznych. Dla celów porównawczych przyjmuje się zwykle wartość opałową biomasy na poziomie ok. 15 MJ/kg (substancji suchej i bezpopiołowej, stan „daf").

Jednakże cechą charakterystyczną wartości opałowej biomasy – jako podstawowego parametru przydatności energetycznej paliw – jest stosunkowo szeroki zakres (rozrzut) wartości tego parametru, jaki on przyjmuje, co wynika ze zróżnicowanego składu (struktury) substancji organicznej pozyskiwanej biomasy (istotny jest gatunek roślin, miejsce wzrastania, warunki atmosferyczne, okres i warunki wegetacji, sezon pozyskiwania i inne). Wszystko to wywiera istotny wpływ na efektywność wykorzystania biomasy oraz eksploatacji stosowanych urządzeń energetycznych.

Z tych względów wartość opałowa biomasy (stan „daf") powinna być generalnie traktowana jako wielkość losowa, przyjmująca wartości z interesującego przedziału, przy określonym prawdopodobieństwie.

Na obecnym etapie analizą objęto typowe rodzaje biomasy, traktowane łącznie jako jeden rodzaj paliwa, o wartości opałowej (dla stanu „daf") traktowanej jako wielkość losowa.

W danej sytuacji istotny jest ponadto sposób pozyskania oraz rodzaj utylizowanej biomasy (rys. 2).

Zagadnienie kształtowania się wartości opałowej biomasy (w zależności od jej podstawowych parametrów), jako wielkości o charakterze losowym, stało się inspiracją do wykonania przedmiotowego opracowania. Podstawą do analizy były dane statystyczne zebrane z dostępnych źródeł literaturowych.

Fenomenologiczny skład paliw stałych – obecność oraz znaczenie balastu

Najistotniejszym składnikiem większości paliw stałych jest substancja palna (zbudowana z pierwiastków: C, H, O, N, S), a następnie tzw. balast, na który składa się:

- substancja mineralna (popiół) oraz
- wilgoć, której ilość (zawartość) może zmieniać się w sposób losowy (wpływ atmosfery otoczenia).

Na dowolną porcję m_p, kg paliwa składa się [2, 4]:

$$m_p = m_0 + m_w \tag{1}$$

gdzie:

m_0 – masa substancji suchej paliwa, kg

m_w – masa wilgoci zawartej w paliwie, kg.

Z kolei na masę m_0, kg substancji suchej paliwa składa się [4]:

$$m_0 = m_B + m_A \tag{2}$$

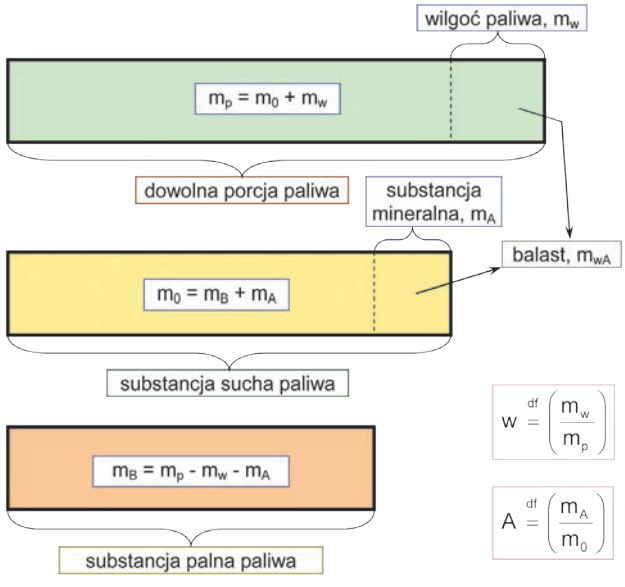
gdzie:

m_B – masa substancji palnej paliwa, kg

m_A – masa substancji mineralnej zawartej w paliwie, kg.

Wśród wymienionych składników (m_B, m_A, m_w) paliwa najistotniejsza jest substancja palna m_B (będąca w dominującej części substancją organiczną), zbudowana głównie z pierwiastków: węgla – C, wodoru – H, tlenu – O, azotu – N, siarki – S.

Wymienione składniki paliwa zawarto w schemacie pokazanym na rysunku 4.



Rys. 4. Główne makroskładniki paliwa

Zawartość wilgoci w paliwie definiuje się jako

$$w \overset{df}{=} \left(\frac{m_w}{m_p}\right), \tag{3}$$

co uwzględnione we wzorze (1) pozwala zapisać tę zależność w postaci

$$m_0 = (1 - w) \cdot m_p \ . \tag{4}$$

Zawartość substancji mineralnej (popiołu) w substancji suchej paliwa wyraża się zwykle w odniesieniu do ilości m_0 substancji suchej, czyli jako iloraz

$$A \overset{df}{=} \left(\frac{m_A}{m_0}\right), \tag{5}$$

a wtedy masa m_B substancji palnej paliwa wyniesie

$$m_B = (1 - A) \cdot m_0 \ , \tag{6}$$

a po uwzględnieniu zależności (4) uzyskuje się:

$$m_B = (1 - A) \cdot (1 - w) \cdot m_p \tag{7}$$

Udział b_{wA} balastu (wilgoć + popiół) w paliwie wynosi

$$b_{wA} \overset{df}{=} \left(\frac{m_w + m_A}{m_p}\right), \tag{8}$$

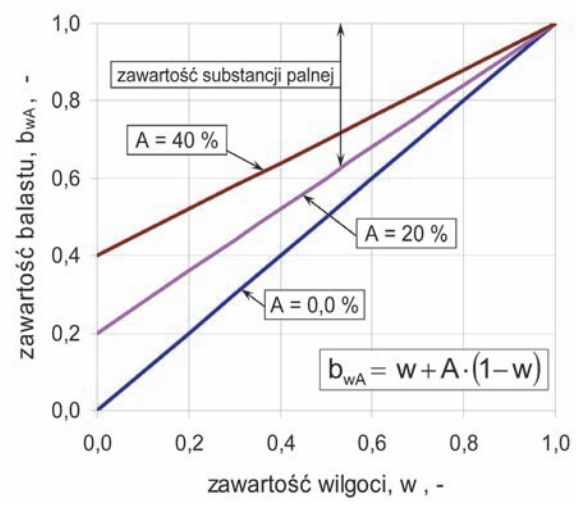
ponadto ze wzorów (3), (4), (5) wynikają zależności:

$$m_w = w \cdot m_p \ , \qquad m_A = A \cdot (1 - w) \cdot m_p \tag{9}$$

stąd ostatecznie:

$$b_{wA} = w + A \cdot (1 - w) = A + w \cdot (1 - A) \ . \tag{10}$$

Korzystając z zależności (10) analizowano wpływ zawartości substancji mineralnej A oraz wilgoci w na zawartość balastu b_{wA} w paliwie, a wyniki zobrazowano na rysunku 5.



Rys. 5. Zawartość substancji palnej oraz balastu w paliwie

Wśród różnych ujęć wartości opałowej paliwa najistotniejsza jest wartość opałowa substancji palnej (obejmująca pierwiastki: C, H, O, N, S) tego paliwa (określana jako stan „daf", czyli stan bezwodny i bezpopiołowy), zwykle oznaczana jako $H_{u,B}$, kJ/kg.

Różnica w zakresie prezentowanych wartości, jako uzupełnienie do jedności (1 – b_{wA}), jest w istocie wagowym (masowym) udziałem substancji palnej (organicznej) w paliwie (rys. 5).

Obecność balastu (wilgoci oraz substancji mineralnej) oddziałuje negatywnie na efektywną wartość opałową paliwa, a w konsekwencji tego – także na sprawność energetyczną urządzeń energetycznych zasilanych tymi paliwami (wypada niższa w stosunku do przypadku zasilania paliwami dobrej jakości).

Wpływ zawartości balastu na wartość opałową paliwa

Obecność balastu (wilgoci, substancji mineralnej) przyczynia się do obniżenia energii chemicznej (wartości opałowej) całkowitej masy stosowanego paliwa.

Energia chemiczna $E_{ch,p}$, kJ (bilansowanie z wykorzystaniem wartości opałowej $H_{u,p}$, kJ/kg) dowolnego paliwa wynosi

$$E_{ch,p} = m_p \cdot H_{u,p} \ , \tag{11}$$

a po uwzględnieniu zależności (1), można ja wyrazić jako

$$E_{ch,p} = m_0 \cdot H_{u,0} + m_w \cdot H_{u,w} \ , \tag{12}$$

gdzie:

$H_{u,0}$ – wartość opałowa substancji suchej, kJ/kg

$H_{u,w}$ – entalpia dewaluacji ciekłej wody, kJ/kg,

która wynosi

$$H_{u,w} = -r_w \ , \tag{13}$$

przy czym:

r_w – entalpia parowania wody (dla t = 100°C $r_w \approx$ 2255,2 kJ/kg), kJ/kg.

Skoro obowiązywać musi relacja (uwzględnia się obecność substancji mineralnej):

$$m_0 \cdot H_{u,0} = m_B \cdot H_{u,B} \ , \tag{14}$$

wtedy

$$H_{u,0} = (1 - A) \cdot H_{u,B} \tag{15}$$

gdzie:

$H_{u,B}$ – wartość opałowa substancji palnej paliwa, kJ/kg.

Ze wzorów (11), (12) oraz (3), (6) uzyskuje się:

$$H_{u,p} = (1 - w) \cdot H_{u,0} + w \cdot H_{u,w} \tag{16}$$

a po uwzględnieniu zależności (15) można napisać:

$$H_{u,p} = (1 - w) \cdot (1 - A) \cdot H_{u,B} - r_w \cdot w \ , \tag{17}$$

a następnie wartość względna:

$$\boxed{\left(\frac{H_{u,p}}{H_{u,B}}\right) = (1 - w) \cdot (1 - A) - w \cdot \left(\frac{r_w}{H_{u,B}}\right)} \tag{18}$$

Entalpia parowania wody przy temperaturze 20°C wynosi ok. $r_w \approx$ 2,45 MJ/kg, podczas gdy wartość opałowa paliw $H_{u,B}$ zawarta jest (w zależności od rodzaju paliwa stałego) w stosunkowo szerokim przedziale od 12 do 34 MJ/kg, przy czym niższe wartości zwykle odnoszą się do różnego rodzaju paliw typu biomasa (przygotowane ujęcie statystyczne pokazane zostało w dalszej części opracowania).

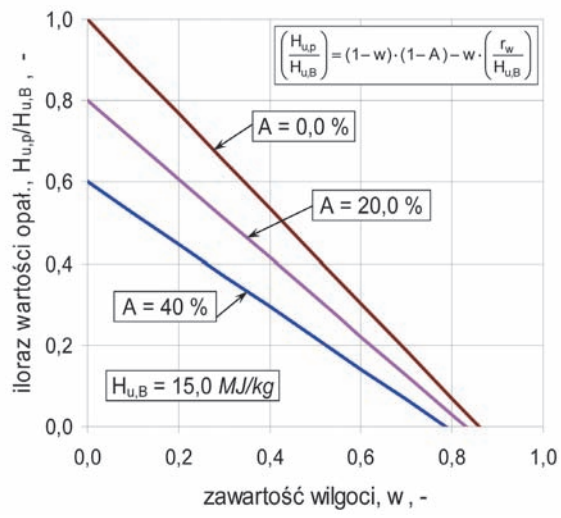
Iloraz wartości ($r_w/H_{u,B}$) wynosi zwykle ($r_w/H_{u,B}$) ≈ (0,07 - 0,20).

Podstawowa funkcja względnych zmian wartości opałowej paliwa ($H_{u,p}/H_{u,B}$), opisana zależnością (18), przy różnych wartościach opałowych substancji palnej $H_{u,B}$ oraz przy różnych zawartościach substancji mineralnej *A* – została pokazana na rysunku 6.

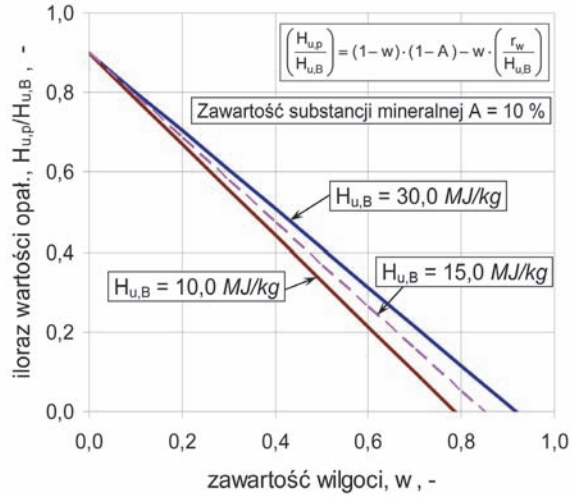
Intensywność oddziaływania wilgoci jest szczególnie wyraźna w przypadku paliw gorszej jakości, czyli o niższej wartości opałowej substancji palnej – ilustracją tej prawidłowości jest rysunek 7.

Analizując przebieg funkcji pokazanych na rysunku 7 oraz korzystając ze wzoru (18) wyznaczyć można taką graniczną zawartość wilgoci w_0, przy której efektywna wartość opałowa paliwa osiągnie wartość zerową, $H_{u,p}$ = 0; wyraża się ona zależnością [3]:

$$w_0 = \frac{(1 - A)}{(1 - A) + \left(\frac{r_w}{H_{u,B}}\right)} \ . \tag{19}$$



Rys. 6. Wpływ zawartości popiołu oraz wilgoci na względną wartość opałową paliwa



Rys. 7. Wpływ zawartości wilgoci oraz wartości opałowej na względną wartość opałową paliwa

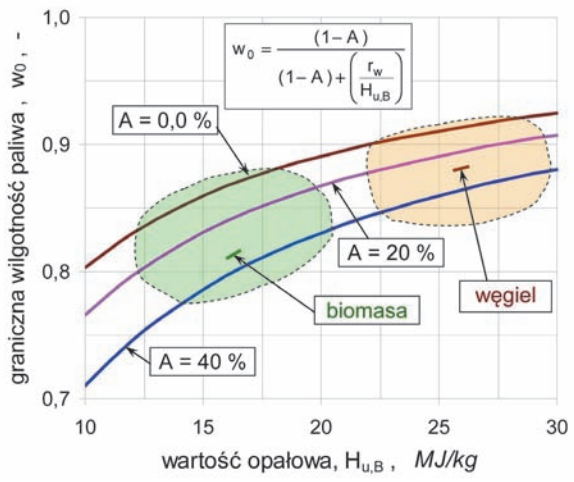
Wpływ zawartości substancji mineralnej A oraz wartości opałowej $H_{u,B}$ substancji palnej na graniczną wartość w_0 wilgotności paliwa – zależność (19), przy której efektywna wartość opałowa paliwa jest bliska zeru ($H_{u,p}$ = 0), zobrazowano na rysunku 8.

Każda analiza wartości opałowej $H_{u,p}$ paliw odnosić się powinna bezpośrednio do wartości opałowej $H_{u,B}$, kJ/kg czystej substancji palnej (stan „daf"). Decydująca w tym zakresie jest najczęściej jej chemiczna budowa oraz skład elementarny (pierwiastki: C, H, O, N, S) substancji palnej.

Zawartość balastu (głównie wilgoci, a także po części substancji mineralnej) dowolnego paliwa kształtuje się często w sposób przypadkowy (losowy, wpływ czynników atmosferycznych, sposobu magazynowania), często także niezależny od służb zaopatrzeniowych oraz eksploatujących urządzenia energetyczne [1, 4].

Paliwa alternatywne (biomasa, biopaliwa) są zazwyczaj paliwami gorszej jakości w porównaniu z typowymi paliwami klasycznymi (np. paliwami płynnymi), ponadto także sprawność energetyczna urządzeń energetycznych zasilanych biomasą

(biopaliwami) wypada niższa w stosunku do przypadku zasilania dobrej jakości paliwami klasycznymi. Stosując współspalanie paliw klasycznych oraz paliw alternatywnych (w tym np. biomasy) można nieco zniwelować ten niekorzystny, czyli tym samym niepożądany efekt energetyczny.



Rys. 8. Wpływ zawartości substancji mineralnej oraz wartości opałowej substancji palnej paliw stałych na graniczną wartość w_0 wilgotności paliwa

Wartość opałowa biomasy w ujęciu statystycznym

Wartość opałowa paliwa jest stanowi podstawowy parametr przydatności energetycznej paliw. W przypadku biomasy jej wartość opałowa jest znacząco niższa od wartości opałowej paliw klasycznych.

Do celów porównawczych przyjmuje się zwykle wartość opałową biomasy na poziomie ok. 17,8 MJ/kg (substancji suchej i bezpopiołowej, stan „daf").

Cechą charakterystyczną tego parametru jest stosunkowo szeroki zakres (rozrzut) wartości, jaki on przyjmuje, co wynika ze zróżnicowanego składu (struktury) substancji organicznej pozyskiwanej biomasy (istotny jest gatunek roślin, miejsce wzrastania, rodzaj i jakość podłoża, warunki atmosferyczne, okres wegetacji i inne). Nawet ten sam gatunek roślin, ale wzrastający w odmiennych warunkach ostatecznie może charakteryzować się efektywnie różną przydatnością energetyczną (w tym głównie wartością opałową dla stanu „daf"); problem ma więc w istocie charakter losowy i wymaga statystycznego ujęcia.

Na aktualnym etapie rozpracowania zagadnienia całość wszelkiego rodzaju biomasy (rys. 2) potraktowano jako jeden rodzaj paliwa stałego, zwanego „biomasa energetyczna", na która składa się kilka typowych grup.

Główne grupy biomasy brane pod uwagę w analizie zagadnienia to:

- słoma różnych roślin (rzepak, pszenica, jęczmień, żyto, owies, ryż),
- łodygi roślin (kukurydza, słonecznik, len, trzcina, fasola, proso, trawy, bawełna),
- różnej postaci drewno pozyskiwane z drzew iglastych (świerk, sosna, jodła, modrzew),
- drewno z drzew liściastych (wierzba, brzoza, buk, dąb, klon, jesion, orzech, olcha, owocowe),
- odpady powstające podczas przeróbki rodzaju drewna (kora, ścinki, trociny, zrębki, liście, igły),
- owocniki pochodzenia roślinnego (strąki, ziarno, orzechy, pestki, łupiny, skorupy, makuchy),
- produkty przetworzone (pelety ze słomy, pelety z drewna, sklejki, brykiety różnego pochodzenia,
- makulatura (papier biurowy i gazetowy, tektura),
- inne pozostałe (osady stałe pofermentacyjne, mikroglony, kompost, płyty wiórowe, podkłady, słupy, pozostałe odpady oraz elementy konstrukcyjne).

Wykorzystując wszelkie dostępne informacje literaturowe [2, 6-10, 16, 20] zebrano potrzebne dane dotyczące wartości opałowej biomasy energetycznej.

Udało się zebrać N_0 = 780 poszukiwanych wartości opałowych, zawartych w przedziale od $H_{d,min}$ = 11,70 MJ/kg do $H_{d,max}$ = 26,30 MJ/kg, wykorzystanych następnie w analizie ilościowej zagadnienia.

Zakres ten podzielony został na L = 33 podprzedziałów (o różnej szerokości $\Delta H_{d,i}$, i = 1, 2, …, L), a w każdym z nich umiejscowiono przynależną do podprzedziału wartość opałową biomasy energetycznej.

W ten sposób wszystkie z N_0 = 780 danych zostało ujęte (liczbowo, N_i, w kolejnym i-tym podprzedziale) w odpowiednim miejscu zaprezentowanej tabeli 1.

Tabela 1

Wartości opałowe biomasy oraz częstość ich występowania

Nr przedziału i	$H_{d,i}$, MJ/kg	$\Delta H_{d,i}$, MJ/kg	N_i	(N_i/N_0)	$(N_i/N_0)/\Delta H_{d,i}$	P_i
1.	12,025	0,65	1	0,0013	0,001972	0,0013
2.	12,675	0,65	3	0,0038	0,005917	0,0051
3.	13,300	0,60	5	0,0064	0,010684	0,0116
4.	13,900	0,60	9	0,0115	0,019231	0,0231
5.	14,475	0,55	12	0,0154	0,027972	0,0385
6.	15,025	0,55	15	0,0192	0,034965	0,0577
7.	15,550	0,50	18	0,0231	0,046154	0,0808
8.	16,050	0,50	24	0,0308	0,061538	0,1116
9.	16,550	0,50	30	0,0385	0,076923	0,1500
10.	17,025	0,45	34	0,0436	0,096866	0,1936
11.	17,475	0,45	40	0,0513	0,113960	0,2449
12.	17,925	0,45	50	0,0641	0,142450	0,3090
13.	18,350	0,40	57	0,0731	0,182692	0,3821
14.	18,700	0,30	62	0,0795	0,264957	0,4616
15.	18,950	0,20	68	0,0872	0,435897	0,5487
16.	19,150	0,20	71	0,0910	0,455128	0,6398
17.	19,300	0,10	35	0,0449	0,448718	0,6846
18.	19,400	0,10	34	0,0436	0,435897	0,7282
19.	19,525	0,15	38	0,0487	0,324786	0,7769
20.	19,675	0,15	28	0,0359	0,239316	0,8128
21.	19,825	0,15	23	0,0295	0,196581	0,8423
22.	20,000	0,20	22	0,0282	0,141026	0,8705
23.	20,200	0,20	17	0,0218	0,108974	0,8923
24.	20,450	0,30	16	0,0205	0,068376	0,9128
25.	20,800	0,40	15	0,0192	0,048077	0,9321
26.	21,250	0,50	14	0,0179	0,035897	0,9500
27.	21,800	0,60	12	0,0154	0,025641	0,9654
28.	22,400	0,60	9	0,0115	0,019231	0,9769
29.	23,050	0,70	7	0,0090	0,012821	0,9859
30.	23,750	0,70	5	0,0064	0,009158	0,9923
31.	24,450	0,70	3	0,0038	0,005495	0,9962
32.	25,175	0,75	2	0,0026	0,003419	0,9987
33.	25,925	0,75	1	0,0013	0,001709	1,0000

Kolejny i-ty przedział ($i = 1, 2, 3, \ldots, L$) obejmuje wartości opałowe z zakresu: $[H_{d,i,min}, H_{d,i,max}]$, przy czym: $H_{d,i,min} = (H_{d,i} - 0{,}5 \times \Delta H_{d,i})$ oraz $H_{d,i,max} = (H_{d,i} + 0{,}5 \times \Delta H_{d,i})$, natomiast liczba konkretnych wartości opałowych, które przynależały do i-tego przedziału wyniosła N_i – ujęte w czwartej kolumnie tabeli 1.

Częstość wartości opałowych kolejnego podprzedziału wyraża się jako: (N_i / N_0), a konkretne wartości zawarte są w piątej kolumnie tabeli 1.

Oczywistą jest relacja liczbowa:

$$N_0 = \sum_{i=1}^{i=L} N_i$$

oraz częstościowa dla podprzedziałów:

$$\sum_{i=1}^{i=L} \left(\frac{N_i}{N_0} \right) = 1 . \tag{20}$$

Funkcję gęstości rozkładu (dP/dH_d) wartości opałowej H_d biomasy wyznacza się jako:

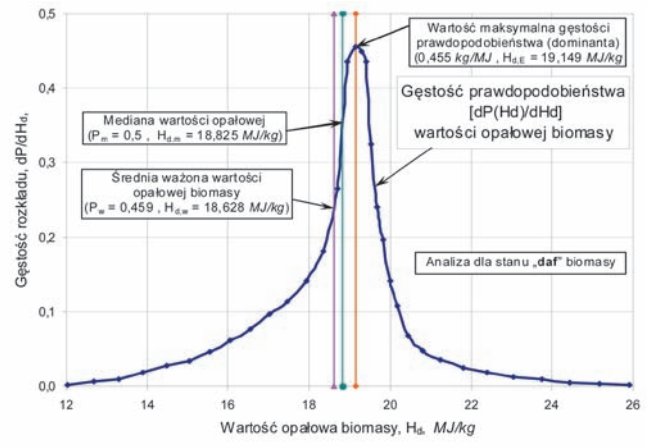
$$\left(\frac{dP}{dH_d} \right)_i \approx \left(\frac{N_i}{N_0} \right) \cdot \frac{1}{\Delta H_{d,i}} , \quad \text{gdzie: } i = 1, 2, 3, \ldots, L . \tag{21}$$

Wyznaczoną w ten sposób funkcję gęstości rozkładu $(dP/dH_d)_i$ wartości opałowej H_d biomasy energetycznej (szósta kolumna tabeli 1) pokazano na rysunku 9.

Wyznaczona funkcja gęstości rozkładu (dP/dH_d) wartości opałowej wykazuje typowy kształt zależności losowych; zmienia się od wartości bliskich zeru, poprzez wartość ekstremalną (rys. 9) – następnie ponownie maleje do wartości bliskich zeru.

Ekstremum (maksimum) funkcji gęstości rozkładu $(dP/dH_d)_i$ wartości opałowej H_d biomasy energetycznej (dominanta) występuje (rys. 9) przy $H_{d,m} \approx 19{,}149$ MJ/kg.

Wyznaczona funkcja gęstości rozkładu (dP/dH_d) wartości opałowej H_d biomasy energetycznej wykazuje kształt asymetryczny; nie jest symetryczna np. względem wartości maksymalnej.



Rys. 9. Funkcja gęstości rozkładu *(dP/dH$_d$)* wartości opałowej H_d biomasy

Z kolei funkcję rozkładu $P(H_d)$ wartości opałowej H_d biomasy energetycznej wyznacza się jako:

$$P(H_{d,j}) \approx \sum_{i=1}^{i=j} \left(\frac{dP}{dH_d} \right)_i \cdot \Delta H_{d,i} , \tag{22}$$

przy czym: $j_{max} = L$ oraz $P(H_{d,L}) \approx 1$, gdzie należy wykorzystać także funkcję gęstości rozkładu $(dP/dH_d)_i$ wartości opałowej H_d biomasy energetycznej określoną zależnością (13), a pokazaną na rysunku 9.

Wyznaczoną w ten sposób funkcję rozkładu $P(H_{d,j})$ wartości opałowej H_d biomasy energetycznej (dane w siódmej kolumnie tabeli 1) pokazano na rysunku 10.

Funkcję rozkładu $P(H_{d,j})$ wartości opałowej biomasy można interpretować jako prawdopodobieństwo tego, że wartość opałowa H_d biomasy energetycznej nie będzie większa od zadanej wartości $H_{d,j}$.

Punktowi maksymalnej wartości funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa (rys. 9), osiąganej przy wartości opałowej $H_{d,E} = 19{,}149$ MJ/kg, odpowiada (rys. 10) wartość funkcji rozkładu prawdopodobieństwa na poziomie $P_E(H_{d,E}) = 0{,}632$.

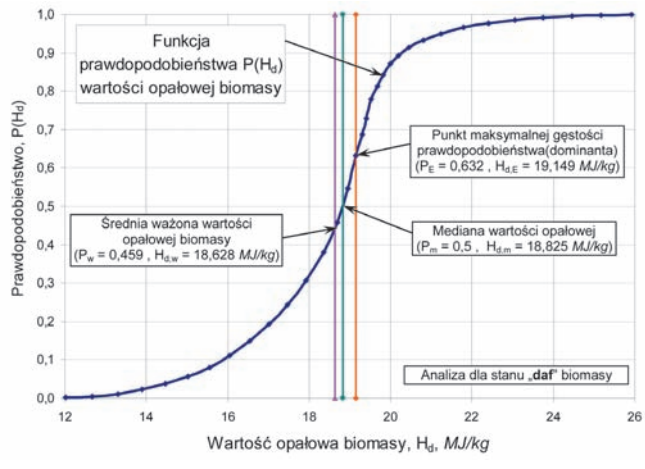
Mediana funkcji rozkładu $P(H_d)$ wartości opałowej biomasy definiowana jest jako rozwiązanie dla warunku $P_m(H_{d,m}) = 0{,}5$, stąd uzyskuje się (rys. 10) wartość $H_{d,m} = 18{,}825$ MJ/kg.

Ważnym parametrem funkcji rozkładu $P(H_d)$ wartości opałowej paliwa jest także wartość średniej ważonej $H_{d,w}$ wartości opałowej biomasy, która jest wyznaczana jako:

$$H_{d,w} \approx \sum_{i=1}^{i=L} \left(\frac{dP}{dH_d} \right)_i \cdot H_{d,i} \cdot \Delta H_{d,i} \tag{23}$$

skąd po wykorzystaniu danych zawartych w tabeli 1 uzyskano wartość: $H_{d,w} = 18{,}628$ MJ/kg, a ponadto odpowiadająca jej wartość funkcji rozkładu prawdopodobieństwa (rys. 10) wynosi $P_w(H_{d,w}) = 0{,}459$.

Wartość ta różni się nieco od przyjmowanych powszechnie [6, 12, 17] wartości szacunkowych wartości opałowej biomasy.



Rys. 10. Funkcja rozkładu $P(H_d)$ wartości opałowej H_d biomasy

W przedstawionym opracowaniu zagadnienia całość różnego rodzaju biomasy ujęto jako jeden rodzaj paliwa stałego, zwanego „biomasa energetyczna", na który składa się kilka podstawowych grup (rys. 2).

W kolejnych etapach można będzie wykonać podobne analizy, lecz odnoszące się do wybranego rodzaju biomasy (rys. 2); decydująca w tym zakresie jest dostępność odpowiedniej liczby wiarygodnych danych eksperymentalnych, odnoszących do wartości opałowej wybranego gatunku biomasy.

Podsumowanie

Wartość opałowa, jako podstawowy parametr energetyczny biomasy, jest zazwyczaj niższa od wartości opałowej paliw klasycznych. Cechą charakterystyczną tego parametru jest stosunkowo szeroki zakres (rozrzut) wartości, jaki on przyjmuje, co wynika ze zróżnicowanego składu (struktury) substancji organicznej pozyskiwanej biomasy (istotny jest gatunek roślin, miejsce wzrastania, warunki atmosferyczne, okres wegetacji i inne). Dla celów analityczno-porównawczych przyjmuje się często wartość opałową biomasy (w odniesieniu do substancji suchej i bezpopiołowej, stan „daf") na bardzo zróżnicowanym poziomie.

W artykule całość różnego rodzaju biomasy potraktowano jako jeden rodzaj paliwa stałego zwanego „biomasą energetyczną", na który składa się kilka podstawowych grup (rys. 2).

Dysponując odpowiednio obszernym zbiorem danych doświadczalnych opracowano funkcję gęstości (rys. 9) rozkładu (dP/dH_d) oraz funkcję $P(H_d)$ rozkładu (rys. 10) wartości opałowej H_d biomasy energetycznej.

Wyznaczone w ten sposób parametry mogą być przydatne podczas opracowania analiz projektowych oraz eksploatacyjnych różnych układów energetycznych, bazujących na wykorzystaniu energii chemicznej biomasy energetycznej.

PIŚMIENNICTWO

[1] Burvall J.: Influence of harvest time and soil type on fuel quality in reed canary grass. *Biomass and Bioenergy* 12. 1997.
[2] CEN: European Committee for Standardization. Solid biofuels: Fuel specification and classes. 2005.
[3] Chmielniak T.: Technologie energetyczne. Wyd. Nauk. Techniczne, Warszawa 2008.
[4] Demirbas A.: Calculation of higher heating values of biomass fuels. *Fuel* 76 (5), 1997.
[5] Demirbas A.: Fuel characteristics of olive husk and walnut, hazelnut, sunflower, and almond shells. *Energy Sources* 24, 2002.
[6] ECN Laboratories: Basic thermal data for biomass. 2005.
[7] Gaur S., Reed T. B.: Thermal data for biomass and over fuels. NREL/TP–433-7965. 1995.
[8] Grover P.D.: Thermochemical characteristics of biomass residues for gasification, Indian Institute of Technology, India, Delhi 1989.
[9] IBSteiner Haustechnik (TGA): Brennstoffdaten und Infos für Biomasse. 2010.
[10] Kitani O., Hall C.W.: Biomass Handbook, Gordon and Breach science publishers. New York 1989.
[11] Leemhuis R.J., Jong R.M.: Biomassa: biochemische samenstelling en conversiemethoden. Petten, ECN 7.2072-GR 2. 1997.
[12] Mitrem A., J., Gomzalez B., Itoiz C., Garbisu C.: Straw quality for its combustion in a straw-fired powerplant. *Biomass and Bioenergy* 21, 2001.
[13] Obernberger I., Thek G.: Physical characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior. *Biomass and Bioenergy* 2004.
[14] Postrzednik S.: Biomasa – jej znaczenie oraz aspekty wykorzystania. *Energetyka* nr 12, 2010.
[15] Postrzednik S.: Analiza parametrów wpływających na energetyczną przydatność paliw. *Energetyka* nr 7, 2011.
[16] Postrzednik S.: Analiza efektywności współspalania paliw – podstawowe parametry, uwarunkowania procesu. *Energetyka* nr 10, 2011.
[17] Ściążko M., Zieliński H.: Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy, Wydawnictwo Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla i Politechniki Śląskiej, Zabrze - Gliwice 2003.
[18] Tillman D.A.: Biomass co-firing: the technology, the experience, the combustion consequences. *Biomass and Bioenergy* nr 19, 2000.
[19] Werther J., Saenger M., Hartge E.U., Ogada T., Siagi Z.: Combustion of agricultural residues; Progress Energy Combustion. *Science* 26, 2008.
[20] Wilén C., Moilanen A., Kurkula E.: Biomass feedstock analyses. VTT publications 282. 1996.

"Systemy wysokich napięć budowane w przeszłości nie były projektowane z myślą o dzisiejszych wyzwaniach"

7 PYTAŃ NA TEMAT ANALIZY DGA*, NA KTÓRE TWÓJ SZEF CHCIAŁBY ZNAĆ ODPOWIEDŹ (I POWINIEN JĄ ZNAĆ)

** Analiza gazów rozpuszczonych*

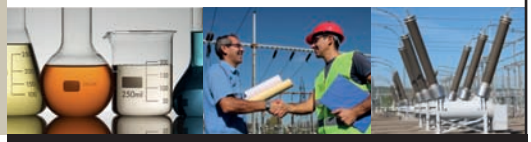
1. Czy urządzenia są bezpieczne w eksploatacji?
2. Co wynik badania mówi o kondycji urządzenia?
3. Co jest potrzebne do serwisowania urządzenia?
4. Czy potrafimy właściwie zinterpretować wyniki?
5. Jaka jest nasza strategia eksploatacji urządzeń na podstawie tych wyników?
6. Jak długo trzeba czekać na wyniki badania?
7. Jak miarodajne są wyniki?

Chcesz wiedzieć więcej? Zadzwoń:
+48 (32) 733 66 76 - 78

TJ | H2b ANALYTICAL SERVICES

TJ|H2b Analytical Services
Badania diagnostyczne, na których możesz polegać

TJ|H2b Analytical Services to niezależna, międzynarodowa sieć laboratoriów i firma doradcza, specjalizująca się w badaniu olejów, gazów i innych materiałów izolacyjnych stosowanych w transformatorach i urządzeniach wysokich napięć.



TJ|H2b Analytical Services (Poland) sp. z o.o.,
Al. Wojciecha Korfantego 191, 40-153 Katowice,
tel.: +48 (32) 733 66 76-78, fax: +48 (32) 730 30 03
e-mail: polandlab@tjh2b.com, www.tjh2b.com