



Kaloryczność paliw stałych

AUTOR: Wiesław Ferens^{a,*}

^a Zakład Inżynierii i Technologii Energetycznych, Instytut I20, Politechnika Wrocławska

* Adres do korespondencji: wieslaw.ferens@pwr.edu.pl, tel. 71 320 37 63

STRESZCZENIE

W pracy analizowano wpływ pochodzenia oraz składu paliw stałych na ciepło spalania i wartość opałową. Stwierdzono dominujący wpływ zawartości pierwiastka węgla oraz balastu, rozumianego jako suma udziałów popiołu i tlenu, na kaloryczność paliw stałych. Porównano ciepło spalania i wartość opałową paliw i wykazano, że różnica między tymi wielkościami jest charakterystyczna dla danej grupy paliw. Zestawiono formuły pozwalające oceniać ciepło spalania paliw na podstawie ich składu pierwiastkowego oraz na podstawie zawartości części palnych i balastu. Przeprowadzono porównanie wartości uzyskanych przy pomocy tych formuł z wartościami mierzonymi i dokonano ich oceny dokładności.

SŁOWA KLUCZOWE: *ciepło spalania, paliwa stałe, własności paliw*

1. WPROWADZENIE

Ciepło spalania lub wartość opałowa jest podstawowym parametrem określającym paliwo i jego przydatność do wytwarzania energii. Ciepło spalania jest ilością energii uzyskaną ze spalania całkowitego i zupełnego jednostki masy paliwa i ochłodzeniu spalin do warunków otoczenia z wykropleniem pary wodnej zawartej w spalinach. Spalaniu ulega całość paliwa i spalanie przebiega do produktów końcowych spalania tzn. do dwutlenku węgla, pary wodnej i dwutlenku siarki. Wartość ciepła spalania określa się na podstawie pomiaru w bombie kalorymetrycznej [1] w warunkach stałej objętości, w atmosferze czystego tlenu. Wartość opałowa różni się od ciepła spalania ciepłem skraplania pary wodnej zawartej w spalinach i określa się ją jako wielkość pochodną ciepła spalania przez odjęcie ciepła skraplania.

Wartość ciepła spalania teoretycznie można wyznaczyć na podstawie składu pierwiastkowego paliwa. Paliwa stałe zawierają przede wszystkim węgiel i wodór oraz dodatkowo tlen, siarkę, azot oraz inne pierwiastki występujące w substancji mineralnej paliwa. Z wymienionych składników dodatni efekt cieplny zapewniają tylko trzy pierwiastki: węgiel, wodór i siarka. Ciepło spalania mieszaniny tych pierwiastków można wyznaczyć na pod-

stawie znanych entalpi tworzenia poszczególnych związków będących produktami końcowymi procesu spalania tych składników, tj. CO_2 , H_2O i SO_2 . Wynoszą one odpowiednio w temperaturze 298 K [2]: 32,76 MJ/kg, 141,9 MJ/kg i 92,57 MJ/kg.

Część węgla, wodoru i siarki jest już związana w różnorodnych związkach chemicznych i dlatego rzeczywisty potencjał energetyczny danego paliwa jest niższy. Najczęściej pierwiastki te występują w związkach z tlenem i przyjmuje się, że zawartość tlenu jest miarą wykorzystania energii zawartej w paliwie. Przykładem związku chemicznego zawierającego węgiel jest węgiel wapnia CaCO_3 . Obecność tego związku w paliwie podwyższa zawartość węgla, o część która jest już na najwyższym stopniu utlenienia i co więcej w czasie spalania paliwa związek pobiera część ciepła na rozkład węglanu do mieszaniny tlenu wapnia i dwutlenku węgla.

Mimo, że pomiar przy pomocy bomby kalorymetrycznej nie jest skomplikowany i czasochłonny, od wielu lat tworzone są formuły umożliwiające określenie wartości opałowej czy ciepła spalania a tym samym ominięcie pomiaru wprost [3–13]. Autorzy tych formuł wiążą kaloryczność paliwa z zawartością pierwiastków C, H, S i O, część dodatkowo uwzględnia zawartość azotu i popiołu. Czynnione są również próby określenia kaloryczności na podstawie ilości części palnych (części lotnych i stałej części palnej) i ilości balastu (zawartość popiołu i wilgoci). Formuły te są tworzone dla wszystkich paliw lub dla wybranych grup. Szczegółowy przegląd stosowanych w literaturze formuł dla węgla i biomas znajduje się w pracach [3–5]. Analiza przydatności wybranych formuł jest przedstawiona w dalszej części pracy.

2. WŁASNOŚCI WYBRANYCH PALIW STAŁYCH

Paliwa stałe są charakteryzowane na podstawie zawartości głównych pierwiastków stanowiących substancję palną organiczną (zawartość, C, H, N, S i O) oraz na podstawie podziału paliwa na składniki paliwa: wilgoć (M), część palną (części lotne V i stała część palna FC) oraz substancję mineralną. Substancja mineralna jest trudna do oznaczenia i dlatego stosuje się zamiennie oznaczenie zawartości popiołu w paliwie (A). Dodatkowo paliwo charakteryzuje się oznaczając jego kaloryczność, mierząc ciepło spalania (HHV) oraz wyliczając wartość opałową (LHV). Pomiar składników odbywa się na zasadzie oznaczania ubytku masy w próbce paliwa umieszczonej w określonej temperaturze. Zawartość pierwiastków oprócz tlenu oznacza się obecnie przy pomocy analizatorów automatycznych przez spalenie próbki paliwa i porównaniu sygnału uzyskanego na detektorach z sygnałem uzyskanym w czasie analizy paliwa wzorcowego o znanym składzie. Skład paliwa oznacza się dla określonego stanu zawilgocenia paliwa. Wartości oznaczone przelicza się na żądany stan paliwa (stan roboczy, suchy).

W tabeli 1 zestawiono własności i kaloryczność przykładowych paliw stałych, które zostały użyte do analiz w niniejszej pracy.

Własności te oznaczono zgodnie z odpowiednimi normami dla poszczególnych grup paliw (np. dla biomas PN-EN 14774-2:2010, PN-EN 15148:2010, PN-EN 14775:2010, PN-EN 14918:2010, PN-EN 15104:2011 oraz PN-EN 15289:2011) z zastosowaniem techniki wagowej i analizatorów automatycznych True Spec CHN i S firmy LECO oraz bomby kalorymetrycznej IKA C2000, w Zakładzie Inżynierii i Technologii Energetycznych Politechniki Wrocławskiej. Wartości oznaczone dla poszczególnych prób przeliczono na stan suchy.

Tabela 1. Własności analizowanych paliw (stan suchy)

Ozn. Próbki	A	V	FC	C	H	N	S	O	Ciepło spalania	Wartość opałowa
	%	%	%	%	%	%	%	%	MJ/kg	MJ/kg
Biomasa										
B1	8,71	70,7	20,6	47,8	5,78	1,50	0,12	36,1	19078	17817
B2	2,62	75,0	22,4	50,7	5,89	0,77	0,11	40,0	20029	18743
B3	7,42	73,5	19,1	47,1	6,13	6,52	0,71	32,2	19590	18253
B4	0,57	83,4	16,0	50,1	6,10	0,17	0,02	43,1	19465	18134
B5	9,44	73,0	17,5	45,3	5,77	0,64	0,08	38,8	17863	16604
B6	4,38	74,7	20,9	49,2	5,85	0,68	0,04	39,9	19401	18123
B7	1,48	80,3	18,2	53,7	6,96	2,04	0,11	35,7	21530	20011
B8	3,87	84,8	11,4	57,8	8,23	5,12	0,21	24,8	26742	24946
B9	0,18	78,7	21,1	51,7	6,34	0,41	0,02	41,3	19036	17652
Koksy										
K1	29,7	<1	70,3	66,7	0,75	0,95	0,07	1,83	22852	22688
K2	10,5	<1	89,5	85,3	0,93	0,83	0,13	2,36	29673	29470
K3	28,0	<1	72,0	65,5	0,81	3,28	0,34	2,06	23657	23479
K4	3,4	<1	96,6	92,4	1,15	0,48	0,02	2,53	32577	32326
K5	35,0	<1	65,0	62,5	0,78	0,86	0,11	0,78	21480	21309
K6	17,3	<1	82,7	76,7	1,17	0,79	0,06	3,98	26754	26498
K7	22,5	<1	77,6	73,8	0,89	0,8	0,39	1,66	26300	26106
K8	0,3	1,5	98,2	97,6	0,03	0,70	1,10	0,26	32900	32893
Odpady										
O1	46,3	46,6	7,14	27,7	5,22	3,29	1,44	16,03	11557	10417
O2	36,0	52,9	11,2	33,9	4,72	5,33	1,24	18,89	14169	13138
O3	15,0	71,3	13,7	42,7	5,46	0,24	0,13	36,53	16895	15704
O4	9,8	76,5	13,7	41,8	5,58	0,26	0,27	42,27	16984	15767
O5	3,4	87,6	8,90	64,7	7,10	0,15	0,18	24,42	26880	25331
O6	12,2	79,3	8,46	57,6	8,45	0,42	0,43	20,91	28680	26835

Tabela 1cd. Własności analizowanych paliw (stan suchy)

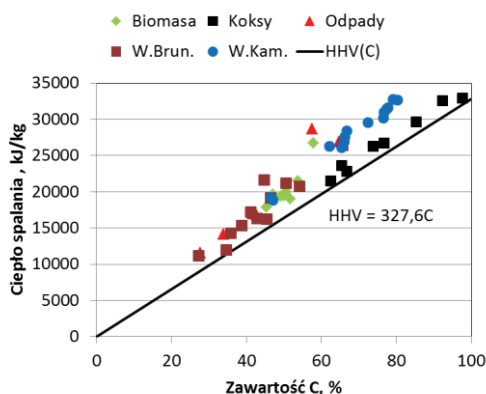
Ozn. Próbki	A	V	FC	C	H	N	S	O	Ciepło spalania MJ/kg	Wartość opałowa MJ/kg
	%	%	%	%	%	%	%	%		
Węgle brunatne										
WB1	44,6	34,3	21,2	38,8	5,15	0,50	0,50	10,51	15330	14206
WB2	22,8	50,0	27,2	44,9	6,51	0,56	0,77	24,52	21571	20150
WB3	37,5	36,7	25,8	41,2	4,38	0,62	1,38	14,90	17107	16151
WB4	27,3	41,6	31,1	50,7	5,51	0,61	0,77	15,12	21122	19918
WB5	44,2	33,6	22,1	35,9	4,25	0,51	0,94	14,13	14245	13317
WB6	11,4	48,9	39,7	65,8	7,07	0,84	0,66	14,26	26344	24801
WB7	55,5	28,2	16,3	27,4	3,56	0,42	0,80	12,28	11146	10368
WB8	31,6	40,4	28,0	46,6	5,25	0,63	1,47	14,47	19059	17913
WB9	21,6	45,3	33,1	54,2	4,89	0,60	2,25	16,49	20699	19632
WB10	38,2	36,2	25,7	42,9	3,94	0,41	2,24	12,33	16239	15380
WB11	36,2	43,6	20,3	45,6	4,38	0,57	3,92	9,39	16203	15247
WB12	47,8	30,9	21,2	34,8	3,41	0,52	1,64	11,84	11908	11164
Węgle kamienne										
WK1	20,5	26,4	53,1	66,1	4,21	1,09	0,76	7,34	26862	25943
WK2	12,2	29,4	58,4	72,5	4,59	1,22	0,67	8,76	29516	28514
WK3	6,9	31,3	61,8	77,8	4,88	1,34	0,65	8,43	31637	30573
WK4	20,1	28,4	51,5	65,4	4,50	1,13	0,98	7,90	26102	25120
WK5	6,8	32,8	60,4	76,8	5,09	1,34	0,59	9,36	30976	29864
WK6	6,5	32,3	61,2	77,4	4,94	1,31	0,48	9,34	31397	30318
WK7	4,9	32,9	62,1	79,2	5,47	1,35	0,67	8,37	32723	31529
WK8	5,0	33,0	62,0	80,3	5,52	1,60	0,58	6,99	32699	31493
WK9	10,7	28,5	60,9	76,5	4,58	1,24	0,60	6,40	30213	29213
WK10	16,1	35,8	48,1	66,3	5,11	1,72	0,46	10,33	27602	26486
WK11	35,9	25,4	38,7	47,1	3,26	0,77	1,28	11,73	18849	18136
WK12	25,1	25,0	49,8	62,2	4,00	1,29	1,00	6,38	26240	25366
WK13	17,7	27,4	54,9	66,7	3,77	1,32	1,24	9,26	28383	27559
WK14	20,5	26,4	53,1	66,1	4,21	1,09	0,76	7,34	26862	25943

Dla każdej z grup paliw występują specyficzne cechy odróżniające je od innych grup. Biomasy charakteryzują się niewielką zawartością popiołu (poniżej 10%), wysoką zawartością tlenu i części lotnych (najwyższą ze wszystkich grup). Koksy powstałe w wyniku odgazowania różnych paliw składają się głównie z węgla i popiołu, brak w nich wodoru i części lotnych. Odpady są paliwami, których własności różnią się w obrębie grupy paliw z powodu różnego pochodzenia (osady ściekowe, odpady komunalne, makulatura).

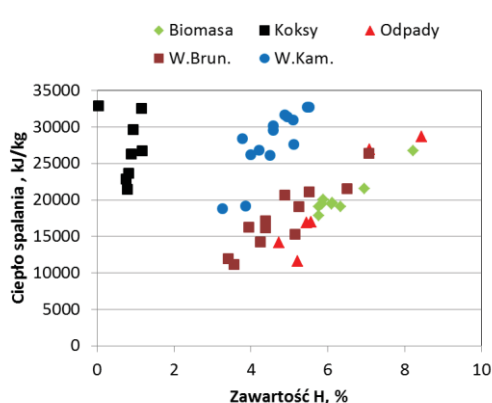
Analiza wyników dla poszczególnych grup paliw pokazuje stosunkowo niewielką zawartość siarki we wszystkich próbach. Nie przekracza ona 1,5% (poza kilkoma próbami węgla brunatnych). Dlatego rola siarki jako źródła ciepła w czasie spalania paliw stałych

jest znikoma i uzyskana ilość energii nie przekracza 150 kJ/kg (w skrajnych przypadkach 400 kJ/kg), co mieści się w granicach dopuszczalnych różnic w oznaczaniu ciepła spalania przy pomocy bomby kalorymetrycznej. Zawartość pozostałych składników palnych oraz balastu (popiołu i tlenu) zmienia się już w szerszym zakresie i ich znaczenie dla oznaczeń kaloryczności jest dalej analizowana.

Na rys. 1 przedstawiono zależność wartości ciepła spalania od zawartości pierwiastka węgla, a na rys. 2, w zależności od ilości pierwiastka wodoru w poszczególnych grupach paliw. Zawartość pierwiastka węgla zmienia się od około 25% (odpady, węgle brunatne niskiej jakości) do prawie 100% (koksy). Na rys. 1 pokazano dodatkową linię oznaczającą trend zmiany ciepła spalania ze wzrostem ilości pierwiastka węgla w paliwie, o współczynnikiem nachylenia równym wartości entalpii tworzenia CO₂ (327,6 kJ/%). Linia ta pokrywa się z oznaczeniami dla koksów z uwagi na niską zawartość innych składników niż węgiel pierwiastkowy i popiół w tych paliwach. Pozostałe paliwa mają ciepło spalania wyższe niż wynika to z samego tylko udziału węgla, gdyż występuje w nich od 3 do 9% wodoru (rys.2). W przypadku odpadów i biomas obecność wodoru kompensuje straty ciepła spowodowane obecnością tlenu w paliwie.



Rys. 1. Zależność ciepła spalania od zawartości pierwiastka C

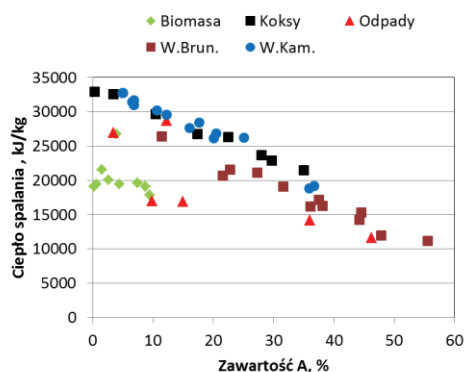


Rys. 2. Zależność ciepła spalania od zawartości pierwiastka H

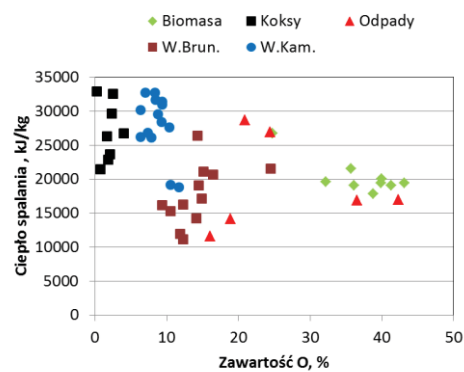
Wpływ zawartości wodoru w paliwie na jego kaloryczność z uwagi na dominujący wpływ pierwiastka węgla jest widoczny w obrębie poszczególnych grup paliw (rys. 2). Pomiedzy paliwami o zbliżonej zawartości wodoru występują znaczne różnice spowodowane głównie różnicą w zawartości pierwiastka węgla.

Popiół jest balastem i jego obecność w paliwie zawsze obniża ciepło spalania. Dla paliw o dużej zawartości popiołu (np. węgle brunatne) ciepło spalania będzie niższe niż dla paliw o niższej zawartości popiołu (rys. 3), gdyż istnieje dodatkowy czynnik obniżający ciepło spalania mimo stosunkowo niedużej zawartości popiołu (np. dla biomas). Tym dodatkowym czynnikiem obniżającym ciepło spalania jest zawartość tlenu w paliwie (rys. 4). Tlen jest balastem a dodatkowo przez to, że występuje w formie związków chemicznych z węglem i wodorem powoduje obniżenie możliwej do uzyskania energii

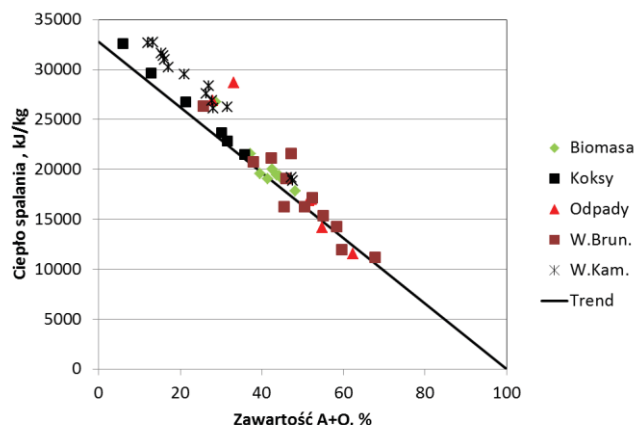
z utlenienia tych pierwiastków. Na rys. 5 pokazano sumaryczny wpływ udziału tlenu i popiołu na kaloryczność. Zamieszczono linię trendu będącą odwróceniem linii z rys.1. Położenie tej linii względem punktów pomiarowych pokazuje, że można wstępnie szacować kaloryczność paliw stosując zawartość węgla lub balastu w paliwie jako wskaźnik kaloryczności.



Rys. 3. Zależność ciepła spalania od zawartości popiołu w paliwie



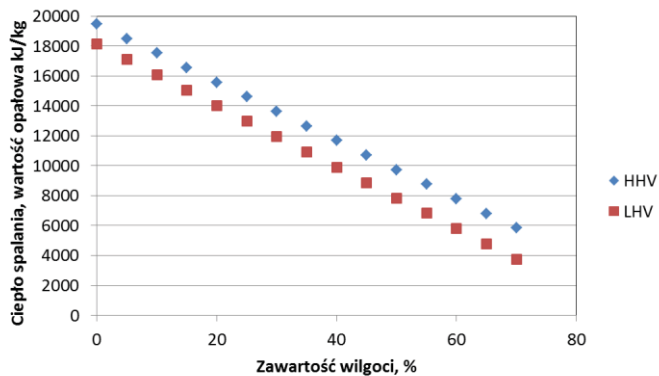
Rys. 4. Zależność ciepła spalania od zawartości pierwiastka O w paliwie



Rys. 5. Zależność ciepła spalania od sumarycznej ilości tlenu i popiołu w paliwie

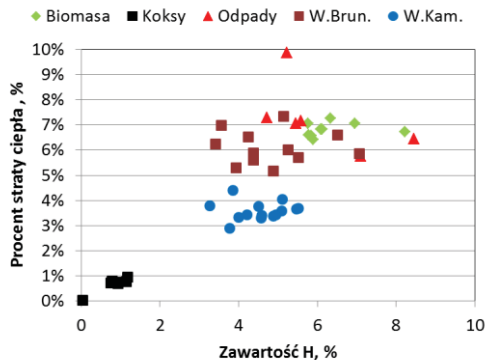
Przedstawione zależności opisują zmiany ciepła spalania spowodowane obecnością poszczególnych pierwiastków i popiołu i dotyczą stanu suchego. W rzeczywistych paliwach istotnym składnikiem paliwa jest wilgoć. Wilgoć w paliwie obniża ciepło spalania proporcjonalnie do swojego udziału. W rzeczywistych układach spalania do analizy sprawności stosuje się zamiast ciepła spalania wartość opałową, która jest niższa od ciepła spalania o ciepło skraplania wilgoci zawartej w spalinach. Na rys. 6 przedstawiono zmianę ciepła spalania i wartości opałowej ze wzrostem zawartości wilgoci w próbce (stan roboczy). Wartość ciepła spalania obniża się ze wzrostem udziału wilgoci proporcjonalnie do

ilości wilgoci w paliwie. Natomiast wartość opałowa zmienia się w większym stopniu z uwagi na wzrastający efekt ciepła skraplania pary wodnej ze wzrostem zawartości wilgoci.

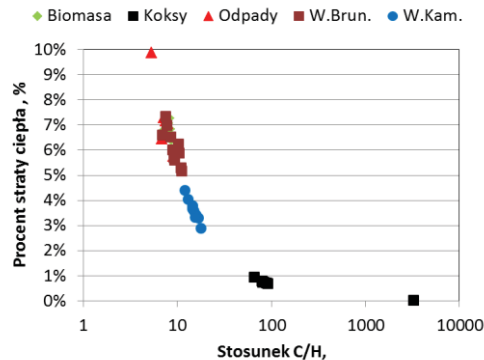


Rys. 6. Zależność ciepła spalania i wartości opałowej od zawartości wilgoci w paliwie B6

Analizując różnice pomiędzy wartością opałową a ciepłem spalania (rys. 7.) można zaobserwować, że ta różnica (liczona względem ciepła spalania) jest większa dla paliw o najwyższej zawartości wodoru. Dla poszczególnych grup paliw występuje zbliżona wartość tej różnicy wynikająca głównie z udziału ciepła spalania wodoru w całkowitym ciepłe. Kluczowym parametrem jest stosunek zawartości pierwiastków węgla i wodoru (tzn. C/H). Dla paliw o największym tym współczynniku, tj. dla paliw w których zdecydowana większość ciepła jest uzyskiwana z węgla, różnica pomiędzy ciepłem spalania i wartością opałową jest najmniejsza (koksy) (rys. 8).



Rys. 7. Względna różnica pomiędzy ciepłem spalania i wartością opałową w zależności od zawartości wodoru w paliwie



Rys. 8. Zależność różnicy ciepła spalania i wartości opałowej od stosunku C/H w paliwie

3. WYZNACZANIE CIEPŁA SPALANIA NA PODSTAWIE SKŁADU PALIWA

W szeregu prac, do oznaczania wartości opałowej lub ciepła spalania stosuje się różne formuły pozwalające przybliżyć te wartości na podstawie składu pierwiastkowego [3], składu technicznego (zawartości części lotnych, stałej części palnej, wilgoci i popiołu) [5]. Formuły te powstają najczęściej na podstawie analizy regresji liniowej kilku zmiennych dla przygotowanego kompletnego zestawu danych wybranych paliw. Tak przygotowane formuły oferują średnio kilkuprocentowe różnice pomiędzy wartościami zmierzonymi a obliczonymi. Pojawiające się nowsze prace pokazują stopniowe poprawianie jakości przybliżeń. Jednak stosowanie ich dla innych paliw niż te, które zostały użyte przy przygotowaniu formuły oznacza większe błędy. Powszechnie stosowana jest formuła Dulonga (1) pochodząca jeszcze z XIX wieku [3] wyprowadzona dla węgla i paliw pochodzenia węglowego (HHV wyrażone w kJ/kg , C , H , S , O - zawartość pierwiastka węgla, wodoru, siarki i tlenu w paliwie wyrażone w %):

$$HHV = 338,3C + 1442,8H + 94,2S - 180,4O \quad (1)$$

Dla paliw węglowych od torfu po atracyty formułę bazującą na składzie pierwiastkowym ale uwzględniającą zawartość popiołu (A %) zaproponowali Neavel i inni [13]:

$$HHV = 339,4C + 1324,9H + 100,2S - 125,3O - 14,65A \quad (2)$$

W pracy Channiwala i Parikh [10] zaproponowali formułę dla wszystkich typów paliw stałych (i dodatkowo dla gazowych i ciekłych) w postaci, uwzględniającą zawartość azotu (N %):

$$HHV = 349,1C + 1178,3H + 100,5S - 103,4O - 21,1A - 15,1N \quad (3)$$

Między innymi w pracach [4-5] stwierdzono, że na dokładność formuł opisujących nie rośnie wraz ze wzrostem ilości zmiennych w nich użytych. Stosowane są formuły obejmujące mniejszą ilość zmiennych. Przykładem takiej formuły jest zaproponowana przez Shenga i Azevedo [12] i wyprowadzona dla biomas:

$$HHV = 313,7C + 700,9H + 31,8O - 1367,5 \quad (4)$$

Yin [9] zaproponował inną formułę dla biomas obejmującą wyłącznie zawartość węgla i wodoru:

$$HHV = 294,9C + 825H \quad (5)$$

Inną formułą uzyskaną ostatnio dla biomas jest zależność określona przez Garcia i innych [4] ze zredukowaną ilością zmiennych:

$$HHV = 303,81C + 81,62O - 4590,68S + 159,92 \quad (6)$$

Dla osadów ściekowych proponowana jest formuła np. Thipkhunthod i inni [6]:

$$HHV = 419,2C - 911,1H + 117,7 \quad (7)$$

Podobnie jak w pracy [7] cechą charakterystyczną tej formuły jest ujemny znak przy

członem zawierającym wodór. Mimo proponowania wielu formuł dotyczących odpadów ich dokładność jest najmniejsza z uwagi na różne pochodzenie i własności odpadów czy nawet tylko w osadach ściekowych.

Innym podejściem do wyznaczania kaloryczności na podstawie formuł jest użycie zawartości części lotnych (V), popiołu (A) i stałej części palnej (FC) wyrażone w procentach masy paliwa. Przykładem takiej formuły jest zależność określona przez Parikh i inni dla wszystkich paliw stałych [8]:

$$HHV = 353,9FC + 155,9V - 7,8A \quad (8)$$

Garcia i inni [5] zaproponowali formułę dla biomas (uwzględniającą zawartość wilgoci M w %):

$$HHV = 165,551FC - 117,51A - 232,69M + 17300 \quad (9)$$

W tabeli 2 zestawiono średnie różnice pomiędzy wartością zmierzoną a obliczoną dla poszczególnych grup paliw. Podkreślono wartości uzyskane dla grup paliw dla których dana formuła była wyprowadzana. Wartość średnią różnicy (WSR w %) określono z zależności dla każdej z grup paliw liczącej n prób:

$$WSR = \frac{\sum \frac{|ZmierzoneHHV - wyliczoneHHV|}{ZmierzoneHHV}}{n} * 100 \quad (10)$$

Tabela 2. Średnia różnica określenia ciepła spalania dla wybranych formuł i grup paliw

Autor	Biomasa %	Koksy %	Odpady %	Węgle brunatne %	Węgle kamienne %
Dulong (1)	4,6	<u>1,4</u>	9,2	12,8	<u>2,3</u>
Neavel i in. (2)	2,6	<u>1,2</u>	<u>6,3</u>	<u>10,8</u>	<u>2,0</u>
Channiwala i i Parikh (3)	<u>4,1</u>	<u>2,3</u>	<u>5,4</u>	<u>9,6</u>	<u>2,1</u>
Sheng i Azevedo (4)	<u>3,6</u>	12,8	5,9	7,4	15,7
Yin (5)	<u>3,1</u>	12,8	5,9	5,3	14,3
Garcia i in (6)	<u>8,9</u>	12,1	17,1	19,8	23,9
Thiphunthod i in.(7)	7,0	18,3	<u>15,0</u>	11,1	8,5
Parikh i in (8)	<u>8,2</u>	<u>6,3</u>	<u>21,1</u>	<u>13,9</u>	<u>15,2</u>
Garcia i in (9)	<u>7,3</u>	6,5	17,2	9,1	12,6

Na podstawie wyników z tabeli 2 można stwierdzić, że nie istnieje jedna formuła przybliżająca wartości mierzone najmniejszą różnicą we wszystkich grupach paliwowych. Z analizowanych formuł najlepsze przybliżenie uzyskuje się stosując formułę Neavel i inni (2) lub Channiwala i Parikh (3). Największe różnice występują w czasie określania ciepła spalania odpadów i węgla brunatnych. Stosowanie formuł opierających się na wynikach analizy technicznej (8 i 9) powoduje powiększenie średniej różnicy.

4. PODSUMOWANIE

W pracy analizowano wpływ poszczególnych własności paliw na wyznaczone ciepło spalania dla różnych typów paliw stałych. Stwierdzono, że główny wpływ na ciepło spalania ma zawartość pierwiastka węgla oraz zawartość balastu w paliwie. Różnica pomiędzy ciepłem spalania i wartością opałową odniesiona do ciepła spalania jest charakterystyczna dla danej grupy paliw i może być przybliżana przy pomocy stosunku C/H dla danego paliwa. Użycie formuł dostępnych w literaturze nie zapewnia właściwego oszacowania ciepła spalania na podstawie zawartości poszczególnych pierwiastków, szczególnie dla węgla brunatnych oraz odpadów dla których różnica pomiędzy wartością zmierzoną i obliczaną przekracza 5%. Dla innych grup paliw możliwe jest stosowanie dedykowanych formuł np. formuły (2) i (3).

LITERATURA

- [1] **PN-ISO 1928:2002** Paliwa stałe - Oznaczanie ciepła spalania metodą spalania w bombie kalorymetrycznej i obliczanie wartości opałowej.
- [2] **Program FACTSAGE 6.4** - www.factsage.com, 2014.
- [3] **Mathews J.P., Krishnamoorthy V., Louw E., Tchapda A.H.N., Castro-Marciano F., Vamsi Karri V., Alexis D.A., Mitchell G.D.**, *A review of the correlations of coal properties with elemental composition*, *Fuel Processing Technology*, Vol. 121, 104-113, 2014, doi:10.1016/j.fuproc.2014.01.015.
- [4] **García R., Pizarro C., Lavín A.G., Bueno J.L.**: *Spanish biofuels heating value estimation. Part I: Ultimate analysis data*, *Fuel*, Vol. 117, 1130–1138, 2014 doi:10.1016/j.fuel.2013.08.048.
- [5] **García R., Consuelo Pizarro C., Lavín A.G., Bueno J.L.**: *Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data*, *Fuel*, Vol. 117, 1139–1147, 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2013.08.049.
- [6] **Thipkhunthod P., Meeyoo V., Rangsunvigit P., Kitiyanan B., Siemanond K., Rirksomboon T.**: *Predicting the heating value of sewage sludges in Thailand from proximate and ultimate analyses*, *Fuel*, Vol. 84, 849–857, 2005, doi:10.1016/j.fuel.2005.01.003.
- [7] **Kathiravale S., Yunus M.N.M., Sopian K., Samsuddin A.H., Rahman R.A.**: *Modeling the heating value of municipal solid waste*, *Fuel*, Vol.82, 1119–1125, 2003, doi:10.1016/S0016-2361(03)00009-7.
- [8] **Parikh J., Channiwala S.A., Ghosal G.K.**: *A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels*. *Fuel*, Vol.84, 487–494, 2005, doi:10.1016/j.fuel.2004.10.010.
- [9] **Yin C-Y.**: *Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses*, *Fuel*, Vol. 90,1128–1132, 2011, doi:10.1016/j.fuel.2010.11.031.
- [10] **Channiwala S.A., Parikh P.P.**: *A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels*. *Fuel*, Vol. 81, 1051–1063, 2002, doi:10.1016/S0016-2361(01)00131-4.
- [11] **Vargas-Moreno J.M., Callejón-Ferre A.J., Pérez-Alonso J., Velázquez-Martí B.**: *A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, 3065–3083, 2012, doi:10.1016/j.rser.2012.02.054.
- [12] **Sheng C., Azevedo J.L.T.**: *Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data*. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 28, 499–507, 2005, doi:10.1016/j.biombioe.2004.11.008.
- [13] **Neavel R.C, Smith S.E., Hippo E.J., Miller R.J.**, *Interrelationships between coal compositional parameters*, *Fuel*, Vol. 65, 3, 312–320, 1986 doi: 10.1016/0016-2361(86)90289-9.