



Możliwość wykorzystania słomy jako źródła paliwowego w kotłach energetycznych

The feasibility of straw as a fuel source for power generating boilers

dr inż. H. KARZCZ, mgr inż. M. KANTOREK, mgr inż. M. GRABOWICZ, prof. dr hab. K. WIERZBICKI

Henryk KARZCZ,
Marcin KANTOREK
Politechnika Wroclawska
Zakład Kotłów i Turbin
hw.karcz@gmail.com
Michał GRABOWICZ
ZBUS-TKW Combustion
sp. z o.o.
biuro@zbus-tkw.pl
Krzysztof WIERZBICKI
Instytut Technologiczno-
-Przyrodniczy
k.wierzbicki@itep.edu.pl



W KILKU SŁOWACH

Obniżenie roli energetyki jądrowej oraz mankamenty eksploatacyjne źródeł ograniczających emisję gazów cieplarnianych zwiększyło rolę jaką mogą spełniać paliwa pochodzące z upraw "agro". Analiza ekonomiczna, agrotechniczna, botaniczna wykazała, że obecnie w Polsce z uprawianych roślin, jedno z największych znaczeń energetycznych posiada słoma rzepakowa.

Słoma rzepakowa charakteryzuje się dużą zmiennością własności fizykochemicznych w zależności od sezonu i regionu geograficznego. Słoma rzepakowa w porównaniu do innych gatunków jest najwyżej uwęglona, posiada najwyższą zawartość chloru i siarki, najniższą zawartość tlenu, najwyższą zawartość popiołu i jest najmniej kaloryczna ze wszystkich gatunków zbóż, lecz jest najbardziej dostępna w dużych ilościach ze wszystkich zbóż.

1. Wstęp

Biomasa w tym przede wszystkim drewno i słoma od niepamiętnych czasów były paliwem umożliwiającym ludziom codzienną egzystencję [1]. Z dostępnych danych wynika, że obecnie około 10% energii pierwotnej zużywanej na świecie pochodzi z biomasy. Przewiduje się że w roku 2050 światowe zapotrzebowanie na energię pierwotną w stosunku do roku 2008 wzrośnie o około 100%. Globalny wzrost wyko-



SUMMARY

The decreased importance of nuclear power engineering and the operating drawbacks of greenhouse gas reduction sources have increased the significance of fuels from agriculture. Economic, agricultural and botanical analyses have demonstrated that the rape straw is among the plants cultivated currently in Poland that are most important to power engineering.

The rape straw has a high variance of physical and chemical properties, which depend on the season and geographical origin. Compared to other species, the rape straw has the highest content of carbon, chlorine, sulphur and ash, with the lowest content of oxygen. It is also the least calorific of all crop species, but of all crops, the material is also the most widely available one in large quantities.

zystania biomasy w okresach pośrednich będzie zależny od działań lokalowych poszczególnych państw lub rejonów.

Możliwości realizacji tych założeń będą zależały od realności dostępu do biomasy oraz od jej kosztów, a także od rozwoju sytuacji politycznej dotyczącej emisji CO₂. Zakładać można, że będzie wzrastać wykorzystanie odpadów z produkcji „agro” i ligninocelulozowej produkcji leśnej. Udział roślin energetycznych jest obecnie trudny do oszacowania, bo jak dotychczas pro-



dukcja ich praktycznie nie wyszła poza obszar pilotażowy.

Obecnie w bilansie energii pierwotnej, największy udział stanowi drewno, zaś biomasa rolnicza stanowi około 10%, w tym rośliny energetyczne około 3%. Rozwój energetycznego wykorzystania biomasy rolniczej powinien uwzględniać prognozy dotyczące wyżywienia i produkcji pasz. Zakładając stabilny rozwój i poprawę agrotechniki, upraw roślin energetycznych na gruntach obecnie użytkowanych rolniczo, produkcja biomasy „agro” może do roku 2050 osiągnąć potencjał około 10-30% udziału energii pierwotnej, bez uszczerbku dla światowej produkcji żywności.

Istnieje przekonanie że dla perspektywicznego rozwoju biopaliw roślinnych zasadnicze znaczenie mają rośliny lignocelulozowe, zarówno trawiaste (proso rozgowe, miskantus) jak i drzewiaste (wierzba, topola, eukaliptus). Do aktualnych trudności w zakresie wdrażania roślin lignocelulozowych do upraw „energetycznych” w Polsce należy zaliczyć warunki klimatyczne i efekty ekonomiczne. Z tego względu rośliny te stanowią bardzo niewielki udział w bilansie paliwowym energii „pierwotnej”.

W ogólnym globalnym światowym zapotrzebowaniu na energię pierwotną, biomasa i odpady stanowią mają w 2030 roku około 10%, energia wodna około 2% oraz inne odnawialne źródła również 2%.

Zasadniczym warunkiem efektywnego wykorzystania biomasy, w pierwszej kolejności jest jej konwersja termiczna i termochemiczna na ciepło, gaz lub olej, a w dalszej kolejności, konwersja biochemiczna na biogaz i na etanol oraz ekstrakcja nasion oleistych na biodiesel.

Ze względu na różnorodny charakter OZE oraz ich występowanie na funkcjonującym już rynku energii, określenie uwarunkowań rozwoju musi być przeprowadzone wielopłaszczyznowo.

Niejednokrotnie zachodzi bowiem potrzeba wykonania studium wielowariantowych koncepcji, aby można było wybrać optymalne rozwiązanie techniczne. Decydując się na wybór rozwiązania technicznego należy mieć na względzie:

- Zabezpieczenie ciągłości dostaw energii zarówno w warunkach normalnych jak i ekstremalnie niekorzystnych dla zagwarantowania

bezpieczeństwa zasilania. Rozwiązanie techniczne powinno przewidywać w tym przypadku instalowanie dodatkowych klasycznych źródeł energii takich jak kotły gazowe lub olejowe bądź pobór energii z sieci rezerwowych.

- Osiągnięcie najkorzystniejszych wyróżników takich jak; sprawność energetyczna, koszt wytworzenia jednostki energii, ciągłości zasilania, pewności pokrycia zapotrzebowania energii itp.
- Równoczesną obsługę różnorodnych odbiorów energii, charakteryzujących się odmiennymi wymaganiami; np. dostarczeniem ciepła do celów CO, CW, pary technologicznej, energii elektrycznej itp.
- Wahania w obciążeniu, odbiorami uzależnionymi od pory dnia, pory roku i zmiennych warunków atmosferycznych.
- Prawidłową ocenę uwarunkowań lokalnych, takich jak; mikroklimat, struktura gruntów, poziom wód gruntowych, występowanie ciepła odpadowego,
- Analizę cen na rynku lokalnym, warunków dostaw, poziomu konkurencji, zachowań i możliwości reakcji ze strony funkcjonujących przedsiębiorstw energetycznych.

Ocena powyższych uwarunkowań narzuca konieczność określenia najkorzystniejszych rozwiązań technicznych dla wyboru technologii energetycznej bazującej na odnawialnych źródłach energii, która uwzględnia wiele różnorodnych aspektów, ograniczeń i możliwości.

O perspektywach rozwoju i wykorzystania odnawialnych źródeł energii w Polsce w sposób istotny decydują uwarunkowania środowiskowe rolnictwa. Są one wyznacznikiem możliwości realizacji różnych funkcji rolnictwa w tym, żywnościowej i energetycznej.

Warunki przyrodnicze oceniane z punktu widzenia produkcji rolnej są w Polsce 30-40% gorsze w porównaniu z krajami Europy Zachodniej. Potencjał rolniczej przestrzeni produkcyjnej jest wyznaczony przez specyfikę warunków przyrodniczych. Średnia roczna temperatura powietrza waha się od 6,0 do 8,8°C, a długość termicznego okresu wegetacyjnego wynosi średnio około 220-230 dni.

Średnia roczna suma opadów atmosferycznych wynosi 500-600 mm na nizinach, 600-700





mm na wyżynach i przekracza 1000 mm w górach [1-2] Regionalne zróżnicowanie potencjału rolniczej przestrzeni produkcyjnej Polski wynika z przestrzennej zmienności pokrywy glebowej, ukształtowania terenu oraz opadów i temperatury.

Plantacje wieloletnich roślin energetycznych należy zakładać na obszarach o rocznej sumie opadów większej od 550 mm. Opad taki może być jednak niewystarczający aby uzyskać wysokie plony z wierzby, miskanta czy topoli, które potrzebują większej ilości wody niż tradycyjne uprawy.

Warunki przyrodnicze i organizacyjno-ekonomiczne determinują możliwości gospodarowania według systemu przyjaznego dla środowiska czy podejmowania produkcji biomasy na cele energetyczne. Na problem polskiego rolnictwa należy jednak spojrzeć w sposób systemowy z uwzględnieniem kierunków i interwencji państwowej.

2. Słoma jako paliwo energetyczne

Słoma to wysuszone źdźbła roślin zbożowych oraz wysuszone łodygi rzepaku – roślin strączkowych lub Inu, które najczęściej stanowią produkt uboczny. W ostatnim czasie często jest wykorzystywana jako paliwo energetyczne [1÷4]

Słoma zbóż w zależności od gatunku zawiera 45-55% celulozy (błonnika), 26-32% hemicelulozy (pentozony) i 16-21% ligniny [5]

Słoma żytnia i jęczmienna, zawiera więcej chloru, a kukurydziana dodatkowo więcej siarki. Natomiast słoma rzepakowa w porównaniu ze słomą zbóż zawiera więcej węgla, azotu, siarki i chloru. Średnio skład chemiczny słomy podstawowych zbóż przedstawiony jest w tabeli nr 1

Oznaczenia analizy technicznej i elemen-

tarnej oraz składu chemicznego uzyskanych w procesie spalania popiołów wykonano w laboratorium Instytutu Chemii i Technologii Nafty i Węgla Politechniki Wrocławskiej.

Produkcja słomy w ostatnich latach tego stulecia ulegała dużym wahaniom w zależności od warunków pogodowych. W ogólnym zbiorze słoma zbóż stanowi w ostatnich latach około 86%, kukurydzy 6,0% rzepaku 7% i strączkowych 1%. Produkcje słomy jako średnie wartości krajowe podano w tabeli nr 2.

Obliczony bilans słomy uwzględniający jej zbiór oraz rozdysponowanie na ściółkę, paszę i przyoranie wskazuje że w skali kraju występuje nadwyżka produkcji, wynosząca około 8,7 mln ton, która może być przeznaczona na cele energetyczne. Wielkość nadwyżek jest wyraźnie zróżnicowana regionalnie. Z nadwyżki szacowanej w kraju na około 8,7 mln ton, tylko około 40-50% można wykorzystać na cele energetyczne ponieważ:

- Na cele energetyczne bardziej przydatna jest tzw. słoma szara czyli pozostawiona po skoszeniu na polu, przez kilka dni, aby deszcz i rosa wylugowały z niej związki chloru i potasu. Słoma taka jest jednak krucha i przy mechanicznym zbiorze jej straty wynoszą 20-30% czyli zbiera się tylko około 70% plonów.

Słoma szara zawiera mniej związków chloru, potasu i siarki, dzięki czemu ograniczone jest korozyjne oddziaływanie spalin na powierzchnie ogrzewalne kotłów. Średnia wartość opałowa różnych gatunków słomy w stanie suchym wynosi około 17,5 MJ/kg. Wartość opałowa słomy bezpośrednio po zbiorze, przy wilgotności 15÷20% waha się od 12 do 14 MJ/kg. Natomiast wartość opałowa słomy zbieranej późną jesienią

Tabela nr.1. Skład chemiczny (uśredniony w skali kraju) słomy podstawowych roślin uprawnych [6]

Rodzaj słomy	Zawartość składnika (% s.m.)								Wartość opałowa		Wilgoć %
	C	H	O	N	S	Cl	Popiół	Części lotne	Wartość opałowa Q ^d (stan suchy) [MJ/kg]	(stan roboczy) Q ⁱ [MJ/kg]	
Żytnia	46,6	6,0	41,9	0,5	0,085	0,40	4,8	76,4	17,5	12,9÷14,1	15÷20
Pszenna	45,6	5,8	42,1	0,5	0,082	0,19	5,7	77,0	17,2	12,6÷13,9	15÷20
Pszennyto	43,9	5,9	43,5	0,4	0,056	0,26	6,0	75,2	17,1	12,4÷13,8	15÷20
Jęczmienna	47,5	5,9	45,6	0,5	0,089	0,40	4,8	77,3	17,5	12,0÷13,9	15÷22
Kukurydziana	45,7	5,3	41,1	0,7	0,177	0,35	6,7	76,8	17,7	5,3÷8,2	45÷60
Rzepakowa	47,1	5,9	39,3	0,8	0,270	0,47	6,2	75,8	17,1	10,3÷12,3	30÷40



Roślina uprawna	Wielkość produkcji [mln ton]			Struktura produkcji [%]		
	2000 rok	2005 rok	2009 rok	2000 rok	2005 rok	2009 rok
Pszennica	7,7	7,9	8,8	33	28	12
Żyto	5,2	4,4	4,8	22	16	15
Pszemżęto	2,1	4,3	5,8	9,5	15	18
Jęczmień	2,2	2,8	4,2	9,5	10	10
Owies	1,2	1,5	1,6	5	5	5
Mieszanki zbóż	2,8	3,5	3,5	13	13	11
Kukurydza	1,0	1,9	1,7	4	7	5
Rzepak	1,0	1,4	2,5	4	5	8
Strączkowe	0,3	0,3	0,3	1	1	1
Razem	23,2	28,1	32,1	100	100	100

Tabela nr 2. Wielkość i struktura produkcji słomy [6]

o wilgotności 45÷60% wynosi około 5-8 MJ/kg. Porównanie wartości opałowej słomy bezpośrednio po zbiorze z wartością opałową energetycznego węgla kamiennego wykazuje, że 1 tonę węgla energetycznego równoważy 1,6-1,7 tony słomy. Mała gęstość nasypowa słomy utrudnia jej wykorzystanie w energetyce, zwiększa koszty transportu i przygotowania do spalania. Z tego względu słoma może być wykorzystana głównie w lokalnych systemach grzewczych (energetyka rozproszona) bez możliwości jej transportu na dalsze odległości. Dla dużych elektrowni konieczne jest zwiększenie jej gęstości nasypowej poprzez brykietowanie lub peletowanie. W tabeli nr 3 przedstawiona została gęstość nasypowa i wartość opałowa różnych form słomy odniesiona do jednostki objętości.

3. Zasoby słomy energetycznej

Masę słomy którą można pozyskać na cele energetyczne w danym regionie kraju należy określić w oparciu o sumaryczną produkcję słomy i zapotrzebowanie dla celów rolniczych i hodowlanych.

Do obliczeń masy słomy na cele energetyczne można wykorzystać następującą formułę:

$$N = P - (Z_s + Z_p + Z_o) \times t \quad (1)$$

Gdzie:

P- sumaryczna produkcja słomy podstawowych zbóż i rzepaku,

Zs- jednostkowe zapotrzebowanie słomy na

Lp.	Postać słomy	Gęstość nasypowa D' [kg/m³]	Wartość opałowa Q _i [MJ/m³]
1.	Luźna	20-50	0,25-0,58
2.	Pocięta	40-60	0,47-0,68
3.	Bele sześciennie 46x36x80 cm	90-100	1,04-1,15
4.	Bele cylindryczne o średnicy 120-150 cm	110	1,26
5.	Bele sześciennie 80x80x240 cm	140	1,62
6.	Bele sześciennie 120x120x240 cm	>165	1,91
7.	Brykiety	300-450	3,59-5,33
8.	Pelety	550-750	8-10

Tabela nr 3. Gęstość nasypowa oraz wartość opałowa w zależności od jej struktury fizycznej [7]

cele ściółkowe,

Zp- jednostkowe zapotrzebowanie słomy na cele paszowe,

Zo- jednostkowe zapotrzebowanie słomy na cele organiczne,

t- ilość jednostek produkcyjnych.

Plony ziarna i słomy zarówno zbóż podstawowych jak i rzepaku, układają się w pewnych proporcjach do siebie. Zależność tą wykorzystuje się przy szacowaniu plonu słomy. Współczynnik plonu słomy do plonu ziarna oznacza się przez W_{sz} Można go również oszacować na podstawie powierzchni uprawy poprzez współczynnik W_{zo} . Stosunek plonu słomy do plonu nasion rzepaku jest równy 1, zaś zbiór słomy w stosunku do areалу upraw wynosi średnio 2,2. Może się wahać od 1,8 do 4,0.

Produkcję słomy (P) w danym obszarze oblicza się według wzoru:

$$P = \sum_{i=1}^n A \times Y \times W_{sz} (t) \text{ lub } P = \sum_{i=1}^n A \times Y \times W_{za} (t) \quad (2)$$

Gdzie:

A- powierzchnia uprawy danego gatunku rośliny (ha),

Y- plon ziarna danego gatunku rośliny (t/ha),

Wsz- stosunek plonu słomy do plonu ziarna,

Wza- zbiór słomy w stosunku do areálu uprawy,

t- ilość jednostek produkcyjnych.

Zapotrzebowanie na słomę ściółkową (Sz) i słomę paszową (Sp) zużywaną w produkcji zwierzęcej oblicza się z zależności [1-2]





$$Z_s = \sum_{i=1}^n q_i \times s_i \quad i \quad Z_p = \sum_{i=1}^n q_i \times p_i \quad (3)$$

Gdzie:

qi-pogłowie danego gatunku zwierząt,

Si- normatywne zapotrzebowanie na słomę ściółkową dla danego gatunku zwierząt.

Uwzględnić należy również zużycie słomy niezbędnej do reprodukcji substancji organicznej w glebie, którą ustala się na podstawie odrębnych analiz obejmujących strukturę zasiewów, jakość gleb oraz saldo substancji organicznej, które jest zależne od rodzaju uprawianych roślin. Saldo substancji organicznej (Sc) określa się z zależności:

$$S_o = \sum_{i=1}^n r_i \times W_{ri} - \sum_{i=1}^n d_i \times W_{di} + \sum_{i=1}^n q_i \times o_i \quad (4)$$

Gdzie:

ri-powierzchnia grupy roślin zwiększających zawartość substancji organicznej,

di- powierzchnia grupy roślin zmniejszających zawartość substancji organicznej,

qi- pogłowie inwentarza żywego według gatunków i grup wiekowych,

Wri- współczynnik reprodukcji substancji organicznej dla danej grupy roślin,

Wdi- współczynnik degradacji substancji organicznej dla danej grupy roślin,

Oi- normatyw produkcji obornika według gatunków [t/rok].

Normatywy zapotrzebowania na słomę paszową, ściółkową i do produkcji obornika oraz współczynniki reprodukcji i degradacji substancji organicznej w glebie podane są w stosownej literaturze [3-4].

Stwierdzenie ujemnego salda substancji organicznej w glebie, oznacza konieczność przyorania określonej ilości słomy. Zakładając że 1 tona suchej masy obornika równoważna jest 154 tony słomy, zapotrzebowanie słomy na przyoranie oblicza się z zależności: $Z_o = 1,54S$

4. Własności fizykochemiczne słomy

Słoma charakteryzuje się dużą zawartością części lotnych $V_{daf} = 70 \div 80\%$ i wysoką zawartością tlenu $O_{daf} \approx 40$ co powoduje bardzo wysoką koncentrację wydzielonej energii cieplnej w początkowej fazie procesu spalania.

Zawartość wilgoci w stanie roboczym podlega dużym fluktuacjom i zmieniać się może od 10 do 60%. Gęstość nasypowa jest bardzo niska i zależy od struktury fizycznej. (tabela nr 3)

Słomę zbożową charakteryzuje bardzo duża zmienność własności fizykochemicznych w zależności od sezonu i regionu geograficznego. Przykładowy skład chemiczny substancji suchej słomy pszennej, żytniej i rzepakowej z rejonu kotliny jeleniogórskiej przedstawiony jest w tabeli nr 4. Oznaczenia składu chemicznego i składu fazowego produktów pirolizy zostały wykonane przez autorów w Instytucie Chemii i Technologii Nafty i Węgla Politechniki Wrocławskiej.

Oznaczenia wykonano zgodnie z Polską Normą węglową odnoszącą się do analizy technicznej i elementarnej. Zawartość części lotnych oznaczono w warunkach zgodnych z PN oraz w warunkach szybkiego nagrzewu ($10^3 \div 5 \times 10^3 \text{ deg/s}$) w temperaturze 1000°C.

W tabeli nr 5 przedstawiono wyniki analizy technicznej i elementarnej słomy rzepakowej pochodzącej z różnych rejonów geograficznych Polski. Pobór próbek oraz wyniki oznaczeń zostały wykonane przez autorów przez autorów w I.Chr i T.N. i w Pol. Wrocławskiej.

Wyniki oznaczeń składu elementarnego substancji organicznej słomy rzepakowej, nie wykazały, właściwie żadnych prawidłowości, które można byłoby utożsamiać z rejonem geograficznym. Jediną cechą która może stanowić pewną prawidłowość jest znacznie większa zawartość

Tabela nr 4. Wyniki analizy technicznej i elementarnej słomy pszennej, żytniej i rzepakowej z rejonu kotliny jeleniogórskiej odniesione do stanu suchego.

Rodzaj słomy	Oznaczenie (% s.m.)												
	Oznaczenia zgodne z PN.										Szybki nagrzew		
	C ^d %	H ^d %	N ^d %	S ^d %	Cl ^d %	O ^d %	A ^d %	V ^d %	K ^d %	Q ^d KJ/kg	V ^d %	K ^d %	A ^d %
pszenna	45,82	5,28	0,43	0,08	0,27	43,89	4,22	78,24	17,51	17068	87,95	9,19	2,8
żytnia	46,17	6,15	0,64	0,07	0,43	40,72	5,81	76,46	17,69	17325	88,26	7,55	4,1
rzepakowa	48,25	5,48	0,95	0,24	0,58	38,30	7,09	74,15	18,71	17030	85,73	8,62	5,6

siarki ($S^d \approx 0,15\%$) i chloru ($Cl^d \approx 0,9\%$) w słomie pochodzącej z najbardziej uprzemysłowionych rejonów Polski (Górny Śląsk i Zachodnia Małopolska). W rejonach tych występuje również wyższe zapopielenie ($Ad \approx 9\%$), a kaloryczność słomy jest najmniejsza ($Q_{di} \approx 16,9 \text{ MJ/kg}$).

W procesie termicznego recyklingu słomy w urządzeniach kotłowych bardzo istotną sprawą z punktu widzenia organizacji procesu spalania w komorze kotła jest rozdział substancji organicznej paliwa na substancję lotną-gazów pirolitycznych i substancję stałą- karbonizat, co ma bezpośrednie przełożenie na rozkład temperatur i pole przepływu gazów spalinowych w komorze kotła.

Wskaźnikiem pomocnym dla właściwego zaprojektowania komory spalania i rozmieszczenia powierzchni ogrzewalnych jest zawartość części lotnych określona wg PN w warunkach standardowych, powolnego nagrzewu.

Przedstawione w tabeli nr 5 wyniki oznaczeń zawartości części lotnych (V^d) określone wg PN wykazały, że zawartość części lotnych zmienia się w dość szerokim zakresie od $V^d=74\%$ do $V^d=84\%$. Z przedstawionych rezultatów wynika pewna prawidłowość, która wskazuje że słoma rzepakowa pochodząca z upraw w rejonach przy-

morskich Polski Północnej, charakteryzuje się większą zawartością karbonizatu. Przeprowadzone oznaczenia ilości gazów pirolitycznych w warunkach szybkiego nagrzewu ($10^3 \div 5 \times 10^3 \text{ deg/s}$) jaki występuje w fazie zapłonu w komorze kotła wykazały prawie 10% przyrost ilości wydzielonych gazów w porównaniu do warunków standardowych. W trakcie procesu szybkiej pirolizy nastąpił, we wszystkich przypadkach, spadek zawartości karbonizatu przeciętnie o 7% i spadek zawartości popiołu o około 2%.

Z porównaniu różnych gatunków zbóż (tabela nr 4) wynika, że słoma rzepakowa przeciętnie jest najwyżej uwęglona ($C^d \approx 485$), posiada najwyższą zawartość chloru ($Cl^d \approx 0,5\%$) i siarki ($S^d \approx 0,25\%$) oraz najniższą zawartość tlenu ($O^d \approx 38,5\%$). Słoma rzepakowa w porównaniu do pozostałych gatunków zbóż zawiera najwyższą zawartość popiołu ($Ad \approx 7\%$) i jest najmniej kaloryczna ($Q_{di} \approx 17,0 \text{ MJ/kg}$). W trakcie procesu pirolizy prowadzonego w warunkach powolnego nagrzewu zgodnie z warunkami określonymi w PN ilość wydzielanych części lotnych jest najniższą w stosunku do innych gatunków zbóż i wynosi około 74%.

Przedstawione wyniki oznaczeń części lotnych (V), karbonizatu (K) i popiołu (A) wykazały

Tabela nr 5. Wyniki analizy technicznej i elementarnej słomy rzepakowej odniesione do stanu suchego.

Region	Oznaczenie (% s.m.)												
	Oznaczenia zgodne z P.N.										Szybki nagrzew		
	C^d %	H^d %	N^d %	S^d %	Cl^d %	O^d %	A^d %	V^d %	K^d %	Q_{di} KJ/kg	V^d %	K^d %	A^d %
Dolny Śląsk	47,85	5,97	0,84	0,03	0,65	37,92	6,74	76,32	16,94	17112	86,15	8,73	5,12
Śląsk Opolski	43,22	5,62	0,73	0,02	0,72	41,83	7,86	73,65	18,49	16985	83,45	10,27	6,28
Górny Śląsk	49,15	5,48	0,94	0,16	0,87	32,06	9,64	72,85	17,51	17046	82,96	10,45	6,59
Małopolska	46,49	5,12	0,65	0,14	0,94	38,51	8,15	71,29	20,56	16985	82,15	11,91	5,94
Świętokrzyskie	45,92	6,08	0,79	0,04	0,48	40,44	6,25	78,15	15,60	17286	84,95	10,30	4,75
Polesie	48,25	6,27	0,96	0,01	0,35	39,30	4,86	79,20	15,94	17365	87,20	9,32	3,48
Mazury	47,90	0,13	0,84	0,01	0,28	37,92	6,92	82,15	10,93	17562	88,25	6,79	4,96
Żuławy	49,74	6,08	0,58	0,01	0,35	39,09	4,15	84,82	11,03	17285	90,32	6,74	2,94
Kujawy	48,35	6,15	0,84	0,02	0,27	39,01	5,36	80,24	14,40	17396	87,28	8,77	3,95
Mazowsze	46,82	6,05	0,64	0,06	0,53	39,06	6,84	78,95	14,21	17142	85,25	9,61	5,14
Środkowo Pomorskie	45,18	5,36	0,58	0,08	0,24	40,63	7,93	74,26	17,81	16985	88,25	6,03	5,72
Zachodnio Pomorskie	44,72	5,08	0,93	0,17	0,56	42,02	6,52	75,29	18,19	17056	85,29	9,88	4,83
Wielkopolska	45,36	5,42	0,74	0,07	0,26	42,78	5,37	74,85	19,78	17126	86,15	9,79	4,06
Warmia	47,24	5,93	0,85	0,13	0,42	40,50	4,93	77,35	17,72	17228	89,15	7,20	3,65





że w procesie szybkiej pirolizy, w wyniku termochemicznych reakcji rozkładu substancji organicznej słomy, następuje częściowe wydzielenie z gazami pirolitycznymi fazy stałej karbonizatu i substancji mineralnej chemicznie związanej z substancją organiczną.

Ubytek fazy stałej, głównie karbonizatu, jest tym wyższy im wyższa jest temperatura pirolizy i większa jest szybkość nagrzewu. Przeprowadzone wyrwykowe badania procesu pirolizy słomy rzepakowej w temperaturze $t_p=900, 1100$ i 1200°C przy szybkości nagrzewu około 10^3deg/s wykazały prawie 15% przyrost gazów pirolitycznych w temperaturze pirolizy $t_p=1200^\circ\text{C}$ i spadek zawartości karbonizatu o około 10÷12% w stosunku do warunków określonych przez PN.

5. Zachowanie się substancji mineralnej słomy w trakcie procesu spalania

Niekorzystnym czynnikiem związanym ze składem chemicznym substancji mineralnej słomy, jest wysoka zawartość związków alkalicznych, głównie soli potasowych, oraz zawartość chloru i sodu, co prowadzi do korozji chlorowej oraz powstania agresywnych aglomeratów żużliowych w komorze kotła i agresywnych osadów na powierzchniach konwekcyjnych.

Przykładowy skład chemiczny popiołu otrzymanego ze spalania słomy rzepakowej, pszennej i żytniej z rejonu Dolnego Śląska przedstawiony został w tabeli nr 6. Wyniki oznaczeń składu chemicznego popiołów pochodzących z powolnego nagrzewu i ze spalania został dokonany przez autorów w I.CHe. i T.N. i w Pol. Wrocławskiej. Wyniki badań odnoszą się do warunków powolnego spopielenia-prażenia jaki występuje przy oznaczeniu części lotnych (V) według PN i powolnego wypalania pozostałego karbonizatu oraz do warunków szybkiego nagrzewu i szybkiego spalania gazów pirolitycznych i karbonizatu. Pozostały po spaleniu popiół został poddany analizie chemicznej. Określono w popiele zawartość niektórych pierwiastków grupy ziem alkalicznych (Ca, Mg), grupy azotowców (P), grupy litowców (Na, K), grupy węglowców (S), grupy glinowców (Al.) grupy tytanowców (Ti) i grupy żelazowców (Fe).

Z punktu widzenia, zachowania się popiołu w trakcie procesu spalania i wymiany ciepła w powierzchniach konwekcyjnych kotła, bardzo istotne znaczenie mają przemiany fazowe związków tych pierwiastków, które charakteryzują się najniższymi temperaturami przemian fizycznych (Na, K, P, Ca, Mg).

Tabela nr 6. Skład chemiczny popiołów z próbek słomy rzepakowej, pszennej i żytniej z rejonu Kotliny Jeleniogórskiej.

Oznaczenie (% s.m. popiołu)	Rodzaj słomy					
	Powolny nagrzew wg. PN			Proces spalania		
	pszen- na	żytnia	rzepa- kowa	pszen- na	żytnia	rzepa- kowa
Al_2O_3	6,48	7,84	9,35	15,52	16,38	18,71
SiO_2	26,45	31,19	32,39	63,33	65,16	64,82
TiO_2	0,12	0,11	0,17	0,31	0,23	0,24
Fe_2O_3	2,15	3,27	4,83	2,02	3,14	4,75
CaO	4,81	4,94	5,83	1,93	2,07	2,16
MgO	1,94	2,96	3,18	1,05	1,24	1,54
K_2O	20,45	19,36	21,93	0,98	1,67	2,05
Na_2O	14,83	15,12	13,95	0,17	0,25	0,96
P_2O_5	3,15	1,63	2,85	0,08	0,03	0,05
reszta	19,74	13,69	5,69	14,61	9,83	4,72

Niezależnie od rodzaju słomy, popiół otrzymany w procesie spalania w warunkach komory kotła znacznie różni się pod względem składu chemicznego od popiołu uzyskanego w warunkach powolnego nagrzewu określonego przez PN. W procesie (przy szybkim nagrzewie $10^3\div 5\times 10^3\text{deg/s}$) występuje duży ubytek popiołu, który częściowo wynoszony jest łącznie z częściami lotnymi i grupami siatek krystalicznych węgla, wskutek gwałtownego wzrostu ciśnienia wewnątrz struktur organicznych słomy w postaci par Na, K i P w wyniku wzrostu temperatury, powyżej temperatury parowania tych pierwiastków.

Niezależnie od rodzajów słomy, najwyższy ubytek udziału masowego obserwuje się (tabela nr 6) w przypadku sodu, potasu i fosforu. Znacznie mniejszy ubytek masowy obserwuje się wśród pierwiastków grupy alkalicznej (Ca, Mg) i bardzo niewielki w przypadku związków żelaza.

W wyniku procesu spalania, słomy, w popiele obserwuje się bardzo znaczny przyrost masowy związków glinu i krzemu w porównaniu do pro-



cesu „prażenia” (powolnego spalania) zgodnie z oznaczeniami popiołu wg. PN.

W Polsce słoma zbożowa jest potencjalnym paliwem energetycznym. Nadprodukcja słomy, w stosunku do zapotrzebowania rolniczego sięga około 10 mln ton rocznie co jest równoważne około 6 mln ton węgla energetycznego.

Kierunek ten niesie jednak za sobą trudności w bezawaryjnym i pewnym eksploatacyjnym prowadzeniu kotłów energetycznych, które były zaprojektowane na węgiel, a więc zupełnie inne paliwo. Współspalanie biomasy z węglem niesie za sobą liczne perturbacje eksploatacyjne i ruchowe kotła. Obniża się jego sprawność termiczna, w tym większym stopniu im większy jest udział słomy w paliwie. W trakcie eksploatacji występują fluktuacje w obciążeniu cieplnym kotła, w aerodynamice fazy gazowej oraz w strukturze popiołu, co może skutkować zużyciem komory, tworzeniem się osadów popiołowych w części konwekcyjnej oraz tworzeniem się aglomeratów żużlowych w przypadku złoża fluidalnego.

Negatywne skutki oddziaływania słomy na zachowanie się substancji popiołu w palenisku kotłowym spowodowane są głównie przez pierwiastki alkaliczne substancji mineralnej, a głównie przez pierwiastki takie jak: sód, potas i fosfor, które odparowują już w temperaturach powyżej około 700°C.

6. Wnioski

1. Słoma rzepakowa w porównaniu do słomy innych gatunków zbóż dla rolnictwa nie jest poszukiwanym materiałem agrotechnicznym poprawiającym strukturę gleby, a dla hodowli zwierzęcej i drobiarskiej nie stanowi żadnego źródła pokarmowego. W rolnictwie i hodowli zwierzęcej słoma rzepakowa stanowi balast odpadowy, który musi zostać poddany procesowi utylizacji poza sektorem rolniczym.
2. Słoma rzepakowa wyprodukowana w różnych regionach geograficznych Polski posiada charakterystyki techniczne różniące się dość znacznie zawartością popiołu oraz składem pierwiastkowym substancji organicznej i substancji mineralnej.
3. Wartość opałowa słomy rzepakowej jest dość

stabilna w odniesieniu do wszystkich regionów kraju, w odniesieniu do stanu suchego wartość opałowa słomy (Qdl) waha wokół wartości 17000kJ/kg.

4. Wilgotność w stanie roboczym (Wr) waha się w szerokim zakresie od 30 do 55% i w znacznym stopniu zależy od czasu przebywania słomy na otwartej przestrzeni.
5. Własności fizykochemiczne słomy rzepakowej pochodzącej z różnych regionów kraju nie wskazują na możliwość jakiegokolwiek usystematyzowania własności od uwarunkowań geograficznych upraw rzepaku. W znacznej mierze są jednak charakterystyczne dla danego regionu geograficznego Polski.
6. Skład chemiczny popiołu w znacznym stopniu jest uzależniony od rodzaju zboża z którego pochodzi słoma. Najwyższe zawartości tlenków krzemu, glinu, tytanu charakterystyczne są dla słomy rzepakowej, która charakteryzuje się najwyższą zawartością popiołu w stosunku do ilości popiołu zawartego w innych rodzajach zbóż.
7. Wzrost szybkości nagrzewu i temperatury procesu pirolizy powoduje wzrost ilości wydzielonych gazów pirolitycznych (Vd) oraz spadek pozostałości koksowej (Kd) i popiołu (Ad) pozostałego po procesie spalania.
8. Wzrost temperatury procesu z 800°C do 1200°C powoduje przyrost ilości wydzielonych gazów pirolitycznych (ΔV) o około 20%, spadek udziału masowego karbonizatu (ΔK) o około 15% i spadek zawartości popiołu (ΔA) o około 5%.
9. Wzrost temperatury procesu spalania powoduje bardzo istotne zmiany w składzie chemicznym substancji popiołu. Następują ubytki masowe pierwiastków tworzących tlenki zasadowe. Największy spadek udziału masowego występuje w związkach potasu, sodu i fosforu. Spadek udziału masowego w związkach wapnia, magnezu i żelaza jest znacznie mniejszy. Udział masowy związków krzemu, glinu i tytanu w popiele otrzymanym w najwyższych temperaturach spalania jest najwyższy.
10. Skłonności popiołu do żużlowania na ruszcie lub w złożu fluidalnym w temperaturach nieco niższych od 1000°C praktycznie nie są zauważalne lub nie występują.

LITERATURA

- [1] Grzybek A., Gradziuk, Kowalczyk K.: Słoma – energetyczne paliwo. Wieś Jutra. Warszawa 2001.
- [2] Klugmann-Radziemska E.: Odnawialne źródła energii – przykłady obliczeniowe. Wyd. Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 2009.
- [3] Majewski E., Wojtkiewicz M., Zakrzewska W.: Ćwiczenia z organizacji i ekonomii gospodarstw rolniczych – zbiór danych liczbowych. Wydawnictwo SGGW-AR Warszawa 1983.
- [4] Kozakiewicz J., Nieścior F.: Słoma i sposoby jej użytkowania w gospodarstwach rolnych. Wydawnictwo JUNG Puławy 1984.
- [5] Król M., Smagacz J.: Rozkład resztek poźniowych w glebie. Monogr. Rozp. Nauk. JUNG-PTB Puławy 2008.
- [6] Harasim A.: Gospodarka Słomą. Wyd. JUNG-PTB Puławy 2011.
- [7] Denisiuk W.: Brykiet/pelet ze słomy w energetyce. Inżynieria Rolnicza 2007, Nr 9, str. 41-47.