

Sebastian WERLE¹

OCENA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA GAZU ZE ZGAZOWANIA OSADÓW ŚCIEKOWYCH

EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF THE SEWAGE SLUDGE GASIFICATION GAS USE

Abstrakt: W pracy zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych wyznaczania normalnej prędkości spalania gazu ze zgazowania osadów ściekowych. Wykorzystano metodę palnika Bunsena. Jednocześnie wyznaczono rozkład temperatury w płomieniu. Wyniki pokazują, że istnieją optymalne warunki prowadzenia procesu spalania gazu ze zgazowania osadów ściekowych, przy których możliwe jest stabilne prowadzenie tego procesu z jednoczesnym efektywnym wywiązywaniem się ciepła. Wyniki wskazują, że niskokaloryczne gazy z termicznego przetwarzania biomasy odpadowej mogą stanowić źródło paliwa na potrzeby produkcji finalnych postaci energii.

Słowa kluczowe: zgazowanie, wysuszone osady ściekowe, normalna prędkość spalania, stabilność spalania

Wstęp

Termiczne metody zagospodarowania osadów ściekowych zyskują na znaczeniu, z uwagi na zbliżającą się perspektywę wprowadzenia zakazu ich składowania [1]. Metody te wciąż jednak wymagają prowadzenia prac badawczych i rozwojowych. Jedną z obiecujących i perspektywicznych technologii jest zgazowanie [2]. W wyniku termochemicznego rozkładu materii organicznej osadów ściekowych powstaje gaz, który może być wykorzystany na wiele sposobów. Może być spalany w silniku, turbinie gazowej czy też kotle, może też stanowić substrat do procesów chemicznych. Gaz ze zgazowania może jednak charakteryzować się dużą zmiennością składu w zależności od warunków prowadzenia procesu oraz składu paliwa poddawanego przemianom. Z tego względu jego wykorzystanie może nastręczać pewnych trudności. Kłopotliwe może się okazać na przykład projektowanie palników oraz komór spalania, by zapewnić efektywną ekologicznie i energetycznie jego utylizację. Z tego względu niezwykle ważne jest poznanie podstawowych właściwości tego gazu. Normalna prędkość spalania jest kluczowym parametrem branym pod uwagę podczas projektowania urządzeń do instalacji paliw gazowych.

Normalna prędkość spalania

Pod pojęciem normalnej prędkości spalania rozumie się prędkość przemieszczania się czoła płomienia w jednorodnej mieszance palnej przepływającej laminarnie lub nieruchomej, mierzoną w kierunku normalnym do powierzchni czoła płomienia [3]. Zatem jest to składowa prostopadła prędkości przemieszczania się czoła płomienia. Prędkość przemieszczania się czoła płomienia jest czasami nazywana prędkością efektywną.

¹ Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska, ul. S. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice, tel. 32 237 29 83, fax 32 237 28 72, email: sebastian.werle@polsl.pl

* Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole'14, Jarnołtówek, 15-17.10.2014

Pomiędzy normalną prędkością spalania a prędkością efektywną zachodzi poniższa zależność [4]:

$$w_n = w_e \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

gdzie: w_n - normalna prędkość spalania [m/s], w_e - efektywna prędkość spalania [m/s], α - kąt pomiędzy wektorem efektywnej prędkości spalania a wektorem prędkości normalnej [°].

Normalna prędkość spalania jest ważnym parametrem wpływającym na stabilność spalania. Płomień jest stabilny, kiedy składowa normalna (do frontu spalania) prędkości przepływu mieszanki jest jej równa. Gdyby prędkość przepływu mieszanki była większa od prędkości spalania, to nastąpiłoby zdmuchnięcie płomienia. Z drugiej strony, jeśli prędkość przepływu mieszanki byłaby mniejsza od prędkości spalania, to płomień zostanie wciągnięty do palnika. Z tego powodu parametr ten odgrywa istotną rolę przy rozważaniu zagadnień związanych właśnie ze stabilnością płomienia. Zależy ona w dużym stopniu zależy od składu mieszanki. Udział takich gazów, jak np. H_2 , powoduje, że jej wartość będzie większa. Również zwiększenie zawartości tlenu powoduje jej wzrost. Natomiast wraz ze zwiększeniem się udziałów objętościowych gazów inertnych, jak np. CO_2 czy N_2 , następuje znaczne obniżenie jej wartości [5]. W tabeli 1 przedstawiono wartości stosunku nadmiaru powietrza λ , przy których, dla poszczególnych gazów, normalna prędkość spalania przyjmuje wartości maksymalne [6].

Maksymalne wartości normalnej prędkości spalania dla różnych paliw [6]

Tabela 1

Maximum values of laminar flame speeds for different fuels [6]

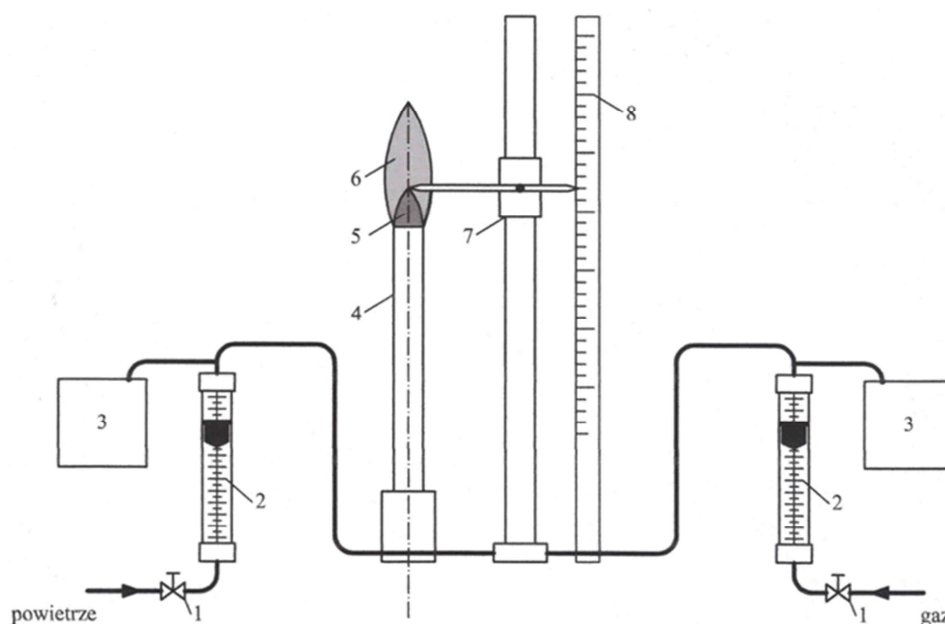
Table 1

Gaz	λ [-]	w_n^{max} [m/s]
Wodór (H_2)	0,56	3,250
Tlenek węgla (CO)	0,49	0,520
Metan (CH_4)	0,93	0,448
Etan	0,88	0,476
Propan (C_3H_8)	0,94	0,464
n-butan	0,97	0,449
n-pentan	0,95	0,430
n-heksan	0,95	0,428
Etylen	0,88	0,735
Acetylen	0,80	1,550
Benzen (C_6H_6)	1,00	0,476
Metanol	0,93	0,504
Disiarczek węgla	1,10	0,594
Siarkowodór (H_2S)	1,11	0,409

Z uwagi jednak na to, że gaz ze zgazowania stanowi mieszaninę wieloskładnikową, w której udział zależy w dużym stopniu od prowadzenia procesu, ważne jest określenie normalnej prędkości spalania tego gazu. Dodatkowo istotne jest również wyznaczenie rozkładu temperatury w płomieniu pochodzącym ze spalania gazu ubogiego.

Eksperyment - stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem metody palnika Bunsena. Na rysunku 1 przedstawiono schemat stanowiska. Główną częścią stanowiska pomiarowego jest palnik z wymiennymi końcówkami (zmienna średnica wylotowa d_1 i d_2), do którego nasady doprowadzano gaz i powietrze za pomocą dwóch oddzielnych przewodów. Stanowisko jest również wyposażone w dwa zawory i dwa rotametry (osobne dla powietrza i gazu). Dzięki zaworom można zmieniać objętościowe natężenie przepływu powietrza i gaz. Natomiast rotametry pozwalają na pomiar strumieni powietrza i gazu. Liniał wraz z przesuwnym wskaźnikiem ze statywem umożliwia określenie wysokości wewnętrznego, kinetycznego stożka spalania.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego: 1 - zawory, 2 - rotametry, 3 - manometry, 4 - palnik, 5 - wewnętrzny kinetyczny stożek spalania, 6 - zewnętrzny dyfuzyjny stożek spalania, 7 - statyw z przesuwnym wskaźnikiem, 8 - liniał

Fig. 1. Scheme of the installation: 1 - valves, 2 - rotameters, 3 - manometers, 4 - burner, 5 - inner combustion (kinetic) cone, 6 - outer (diffusive) combustion cone, 7 - stand with a moveable pointer, 8 - ruler

Przedmiotem badań był gaz ze zgazowania osadów ściekowych o składzie przedstawionym w tabeli 2.

Skład gazu ze zgazowania osadów ściekowych (udziały objętościowe)

Tabela 2

Composition of gas from sewage sludge gasification (in volume fractions)

Table 2

CH ₄ [%]	CO [%]	N ₂ [%]	H ₂ [%]	CO ₂ [%]
1,0	28,5	50,5	5,0	15,0

Na podstawie przeprowadzonych badań obliczono efektywną prędkość spalania ze wzoru:

$$w_e = \frac{\dot{V}_{grz} + \dot{V}_{prz}}{\pi \frac{D^2}{4}} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2)$$

gdzie: \dot{V}_{grz} - rzeczywisty objętościowy strumień gazu [m^3/s], \dot{V}_{prz} - rzeczywisty objętościowy strumień powietrza [m^3/s], D - średnica palnika [m].

W następnym kroku policzono stosunek nadmiaru powietrza λ ze wzoru:

$$\lambda = \frac{\dot{V}_{prz}}{\dot{V}_{grz} \cdot n_{amin}} \quad (3)$$

gdzie n_{amin} - minimalne zapotrzebowanie powietrza [kmol pow./kmol gazu suchego g.s.].

Minimalne zapotrzebowanie powietrza n_{amin} wyznaczono jako:

$$n_{amin} = \frac{n_{O_2min}}{z_{O_2}} \quad (4)$$

gdzie: n_{O_2min} - minimalne zapotrzebowanie na tlen [kmol O_2 /kmol g.s.], z_{O_2} - udział molowy/objętościowy tlenu w powietrzu (przyjęto $z_{O_2} = 0,21$).

Minimalne zapotrzebowanie powietrza wyliczono ze wzoru:

$$n_{o2min} = n'_C + n'_S + \frac{1}{2} \cdot n'_{H_2} - n'_{O_2} \quad (5)$$

gdzie: n'_C , n'_S , n'_{H_2} , n'_{O_2} - jednostkowa zawartość podstawowych składników paliwa gazowego, odpowiednio: węgla, siarki, wodoru i tlenu [kmol składnika/kmol g.s.].

Następnie wyznaczono kąt φ . Kąt φ to kąt pomiędzy wektorem prędkości normalnej a wektorem prędkości efektywnej. Korzystając z podobieństwa trójkątów, można stwierdzić, że ma on taką samą wartość co kąt pomiędzy promieniem R palnika, a pobocznicą stożka l . Można go wyznaczyć ze wzoru:

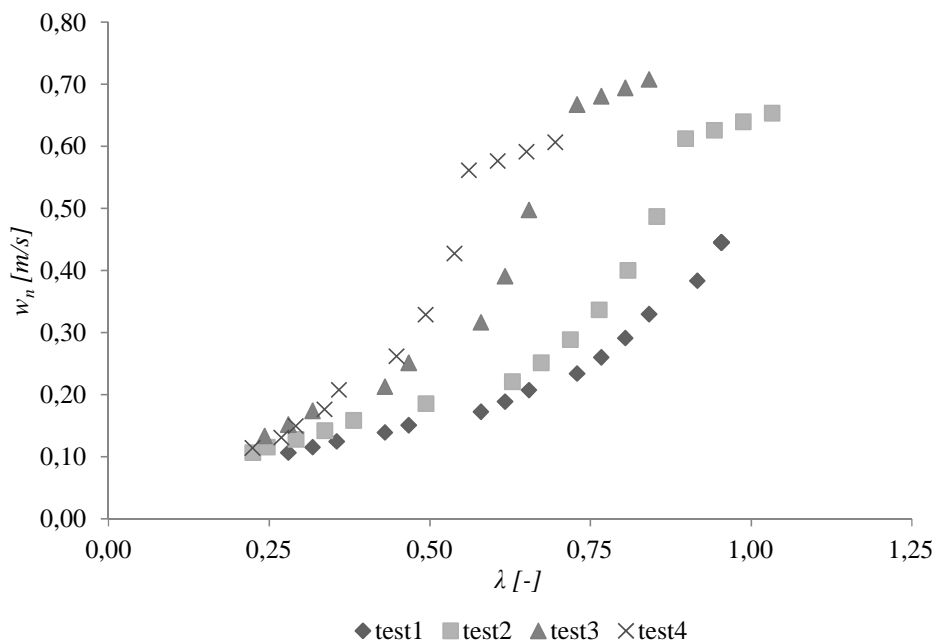
$$\alpha = \arctg\left(\frac{H}{R}\right) \quad (6)$$

gdzie: H - wysokość stożka spalania (kinetycznego) zmierzona podczas eksperymentu [m], R - promień palnika, zmierzony podczas eksperymentu [m].

Następnie policzono normalną prędkość spalania, korzystając z zależności (1).

Wyniki badań

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki uzyskane podczas pomiaru normalnej prędkości spalania dla dwóch średnic $d_1 = 12,4$ mm i $d_2 = 19$ mm i dla dwóch wartości strumienia objętościowego przepływającego gazu $\dot{V}_{grz} = 500$ i $\dot{V}_{grz} = 600$ dm^3/h . Analizując wykres na rysunku 2, można stwierdzić, że wraz ze wzrostem stosunku nadmiaru powietrza normalna prędkość spalania rośnie. Przebieg zależności przyjmuje postać krzywej dzwonowej, co jest zgodne z danymi literaturowymi [7]. Wykres otrzymany z wyników pomiarów to tylko fragment takiej krzywej dzwonowej. Wyznaczenie normalnej prędkości spalania dla większego zakresu zmian stosunku nadmiaru powietrza okazało się niemożliwe z powodu utraty stabilności płomienia. Jest to istotna cecha gazu ze zgazowania osadów ściekowych w kontekście oceny jego przydatności w rzeczywistych instalacjach przemysłowych.

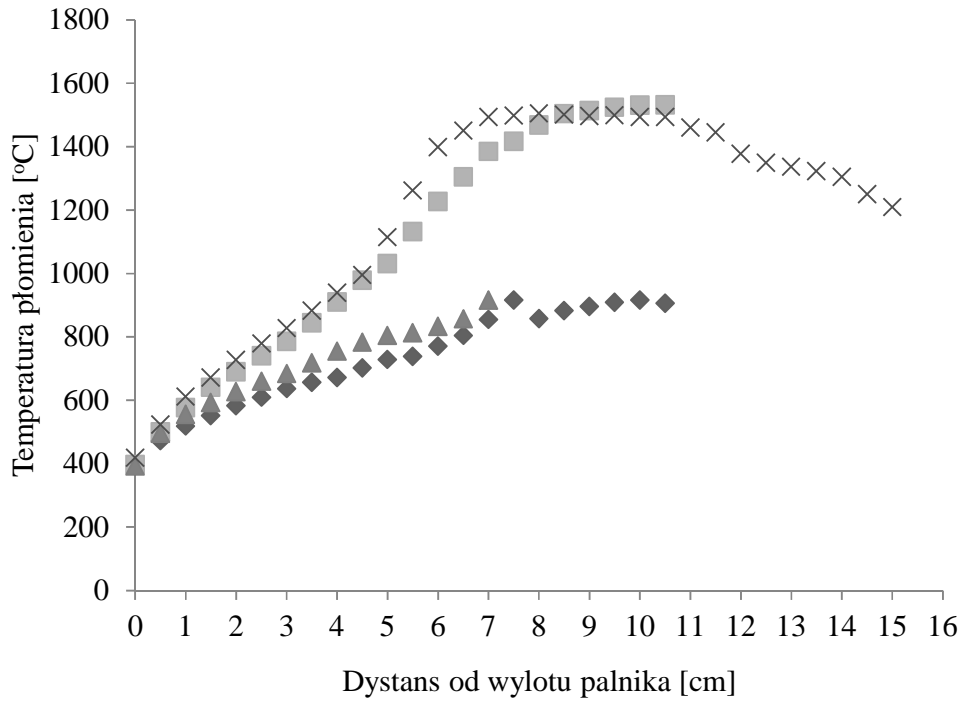


Rys. 2. Zależność normalnej prędkości spalania w funkcji stosunku nadmiaru powietrza λ ; test1 - $d_1 = 19$ mm, $\dot{V}_{grz} = 500$ dm³/h; test2 - $d_1 = 19$ mm, $\dot{V}_{grz} = 600$ dm³/h; test3 - $d_2 = 12,4$ mm, $\dot{V}_{grz} = 500$ dm³/h; test4 - $d_2 = 12,4$ mm, $\dot{V}_{grz} = 500$ dm³/h

Fig. 2. Laminar flame speed of gas from sewage sludge gasification as a function of excess air ratio λ ; test1 - $d_1 = 19$ mm, $\dot{V}_{grz} = 500$ dm³/h; test2 - $d_1 = 19$ mm, $\dot{V}_{grz} = 600$ dm³/h; test3 - $d_2 = 12,4$ mm, $\dot{V}_{grz} = 500$ dm³/h; test4 - $d_2 = 12,4$ mm, $\dot{V}_{grz} = 600$ dm³/h

Na rysunku 3 przedstawiono rozkład temperatury w płomieniu wzdłuż jego wysokości. Analizując zaprezentowane wyniki, można stwierdzić, że najwyższe temperatury osiągnięte są przy wierzchołku płomienia. Jednocześnie widać, że podczas testów z wyższym strumieniem przepływającego gazu osiągnięta temperatura płomienia jest wyższa.

Na rysunku 4 przedstawiono porównanie wyników badań eksperymentalnych normalnej prędkości spalania otrzymane dla gazu ze zgazowania osadów ściekowych z innymi paliwami gazowymi uzyskiwanymi w procesie zgazowania biomasy. Skład tych gazów umieszczono w tabeli 3. Wartość maksymalnej normalnej prędkości spalania dla gazu ze zgazowania osadów ściekowych otrzymana z pomiarów odbiega od wartości w_n^{max} gazów o podobnym składzie. Mimo tego, że badany gaz ze zgazowania osadów ściekowych charakteryzuje się najniższą zawartością wodoru, to uzyskane wartości normalnej prędkości spalania są najwyższe w porównaniu z innymi gazami. Dlatego należy postulować, że ta duża wartość w_n^{max} dla gazu ze zgazowania osadów ściekowych, odbiegająca od wartości w_n^{max} uzyskanej dla gazów o podobnym składzie, jest prawdopodobnie głównie spowodowana specyfiką zastosowanej metody palnika Bunsena, w szczególności jej wrażliwością na zewnętrzne czynniki zaburzające stabilność płomienia.



◆ test1 ■ test2 ▲ test3 × test4

Rys. 3. Rozkład temperatury w płomieniu; test1 - $d_1 = 19$ mm, $\dot{V}_{grz} = 500$ dm³/h ; test2 - $d_1 = 19$ mm, $\dot{V}_{grz} = 600$ dm³/h; test3 - $d_2 = 12,4$ mm, $\dot{V}_{grz} = 500$ dm³/h; test4 - $d_2 = 12,4$ mm, $\dot{V}_{grz} = 500$ dm³/h

Fig. 3. Temperature distribution in the flame; test1 - $d_1 = 19$ mm, $\dot{V}_{grz} = 500$ dm³/h ; test2 - $d_1 = 19$ mm, $\dot{V}_{grz} = 600$ dm³/h; test3 - $d_2 = 12,4$ mm, $\dot{V}_{grz} = 500$ dm³/h; test4 - $d_2 = 12,4$ mm, $\dot{V}_{grz} = 500$ dm³/h

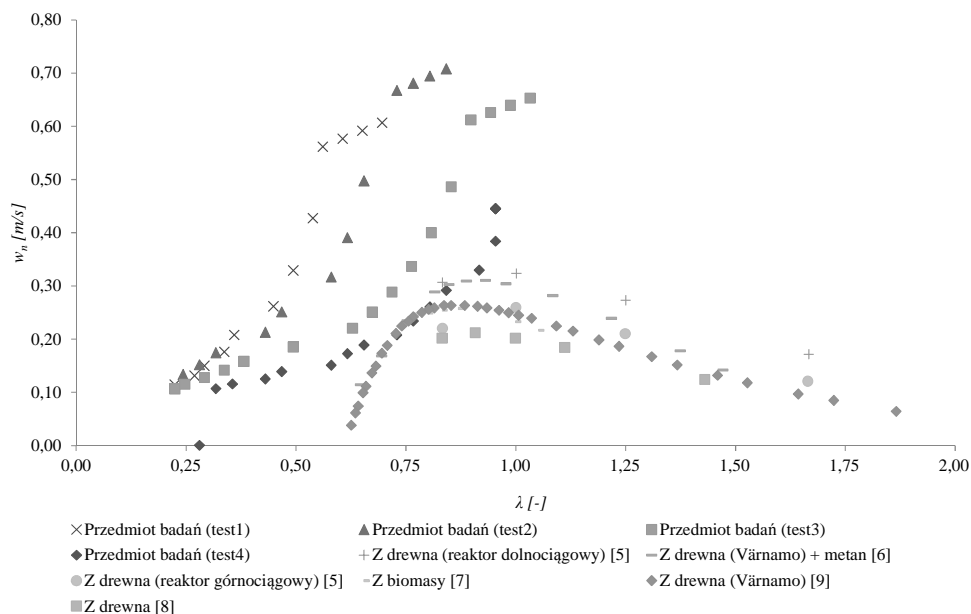
Skład gazów ze zgaszowania biomasy

Tabela 3

Composition of gases from biomass gasification

Table 3

Gaz	Skład gazu [% obj.]							
	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	N ₂	O ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
Z drewna (reaktor dolnociągowy) [5]	14	20	9	7	50	0	0	0
Z drewna (Värnamo) + metan [6]	15,2	10,6	9,6	24,6	40,0	0	0	0
Z drewna (reaktor górnciągowy) [5]	14,2	14,2	10,7	3,5	55,2	1	1	0,2
Z biomasy [7]	25,0	10,0	12,5	2,5	50,0	0	0	0
Z drewna (Värnamo) [9]	21	13	17	1	48	0	0	0
Z drewna [8]	20	0	20	0	60	0	0	0



Rys. 4. Normalna prędkość spalania różnych gazów z procesu zgazowania biomasy w funkcji stosunku nadmiaru powietrza λ [5-9]

Fig. 4. Laminar flame speed of various gases from biomass gasification as a function of excess air ratio λ [5-9]

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz można sformułować następujące wnioski:

1. Normalna prędkość spalania jest ważnym parametrem projektowym procesu spalania. Odgrywa istotną rolę przy rozważaniu zagadnień związanych ze stabilnością płomienia. Z uwagi na to, że gazy ze zgazowania biomasy nie są typowymi gazami, istnieje potrzeba wyznaczenia ich normalnej prędkości spalania.
2. Normalna prędkość spalania jest stała dla danego gazu i nie zależy od średnicy palnika.
3. Na wartość normalnej prędkości spalania duży wpływ ma udział objętościowy wodoru w gazie, ponieważ to wodór ma największą prędkość spalania ze wszystkich gazów. Wynika to z dużej dyfuzyjności cieplnej i masowej wodoru. Badany gaz ze zgazowania osadów ściekowych charakteryzuje się najniższą zawartością wodoru w porównaniu z innymi gazami wziętymi do analizy. Mimo to jego normalna prędkość spalania jest najwyższa.
4. Wartość w_n^{max} dla gazu ze zgazowania osadów ściekowych otrzymana z pomiarów jest większa od wartości w_n^{max} dla gazów o podobnym składzie. Ta różnica jest spowodowana specyfiką metody zastosowanej do jej wyznaczenia.
5. Na wartość normalnej prędkości spalania ma także wpływ udział gazów inertnych, jak ditlenek węgla i azot, w mieszaninie. Wraz ze wzrostem ich udziału w mieszaninie w_n^{max} maleje.

Podziękowania

Praca naukowa wykonana w ramach projektu własnego DEC-2011/03/D/ST8/04035 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 8 stycznia 2013 r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu. DzU Nr 0, poz. 38. <http://isap.sejm.gov.pl/DetailsServlet?id=WDU20130000038>.
- [2] Werle S, Wilk RK. Analiza przydatności gazu ze zgazowania osadów ściekowych w gazownictwie. Rynek Energii. 2011;4:23-27. <http://docplayer.pl/1241611-Analiza-przydatnosci-gazu-ze-zgazowania-osadow-sciekowych-w-gazownictwie.html>.
- [3] Petela R, redaktor. Paliwa i ich spalanie. Część V. Laboratorium, Skrypty Uczelniane Nr 1191. Gliwice: Wyd. Politechniki Śląskiej; 1984.
- [4] Wilk R, redaktor. Laboratorium techniki spalania, Gliwice: Wyd. Politechniki Śląskiej; 2011.
- [5] Petela R, redaktor. Paliwa i ich spalanie. Część III. Płomień. Skrypty Uczelniane Nr 1044. Gliwice: Wyd. Politechniki Śląskiej; 1982.
- [6] Monteiro E, Bellenoue M, Sotton J, Moreira NA, Malheiro S. Laminar burning velocities and Markstein numbers of syngas-air mixtures. Fuel. 2010;89:1985-1991. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.11.008.
- [7] Liu C, Yan B, Chen G, Bai XS. Structures and burning velocity of biomass derived gas flames. Int J Hydrogen Energy. 2010;35:542-555. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.11.020.
- [8] Yan B, Wu Y, Liu C, Yu JF, Li B, Li ZS. Experimental and modeling study of laminar burning velocity of biomass derived gases/air mixtures. Int J Hydrogen Energy. 2011;36:3769-3777. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.12.015.
- [9] Ouimette P, Seers P. Numerical comparison of premixed laminar flame velocity of methane and wood syngas. Fuel. 2009;88:528-533. DOI:10.1016/j.fuel.2008.10.008.

EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF THE SEWAGE SLUDGE GASIFICATION GAS USE

Institute of Thermal Technology, Silesian University of Technology, Gliwice

Abstract: The paper presents the results of experimental investigation of the laminar flame speed of the sewage sludge gasification gas. Bunsen burner method was used. Additionally, the temperature distribution in the flame was determined. The results show that there are optimum conditions for conducting combustion of the sewage sludge gasification gas, with which it is possible to carry out the stable process with effective heat release. The results indicate that low calorific gas from the thermal processing of waste biomass can be a source of fuel for the production of final forms of energy.

Keywords: gasification, dried sewage sludge, laminar burning velocity, combustion stabilization