

Eugeniusz Orszulik, Małgorzata Jaroń-Kocot

PROCES ZGAZOWANIA ODPADÓW DREWNOPOCHODNYCH

Streszczenie

W artykule omówiono proces niskotemperaturowego zgazowania odpadów drewnopochodnych. Scharakteryzowano podstawowy produkt zgazowania, tj. gaz procesowy, głównie pod kątem jego przydatności jako paliwa uzupełniającego wsad węgla kamiennego spalanego w kotłach wodnych w energetyce.

Proces niskotemperaturowego zgazowania odpadów drewnopodobnych przebiega w trzech fazach. Pierwsza faza to podgrzewanie i rozpalanie odpadów (350–750°C), druga to ich właściwe zgazowanie (250–350°C), a trzecia faza to dopalanie odpadów (650–950°C). W wyniku procesu zgazowania wydzielają się gaz procesowy, w skład którego wchodzi gazy palne takie, jak: wodór, tlenek węgla, metan, etan, etylen oraz gazy niepalne, tj. dwutlenek węgla i azotu oraz para wodna.

Zgazowanie odpadów drewnopochodnych należy do inwestycji proekologicznych. Wiąże się z odzyskiem surowców wtórnych (produkcja gazu procesowego), a otrzymane w wyniku spalania tego gazu spaliny charakteryzują się składem umożliwiającym ich emisję do powietrza jedynie po odpyleniu bez dodatkowego oczyszczania chemicznego. Odpady stałe są wydzielane w ilościach nieznacznych i nie przekraczają 10% masy odpadów drewnopochodnych przeznaczonych do zgazowania.

Process of wood derivative wastes gasification

Abstract

The article presents the process of low temperature gasification of wastes of wood derivatives. The basic gasification product, i.e. the process gas, has been characterised, mainly paying special attention to its usefulness as the fuel supplementing the hard coal charge burned in water heaters in the power industry.

The process of low temperature gasification of wood derivative wastes proceeds in three stages. The first stage constitutes preheating and heating of wastes (350–750°C), the second stage makes their real gasification (250–350°C), and the third stage comprises burning out of wastes (650–950°C). As a result of the gasification process gas is emitted, including such combustible gases as: hydrogen, carbon monoxide, methane, ethane, ethylene and non-combustible gases, i.e. carbon dioxide and nitrogen dioxide as well as water vapour.

Gasification of wood derivative wastes belongs to proecological investments. It is connected with the recovery of secondary raw materials (production of process gas), and the flue gases obtained as a result of this gas combustion are characterised by a content enabling their emission into the air only after dust extraction without chemical purification. Solid wastes are emitted in small quantities and they do not exceed 10% of the mass of wood derivative wastes designed for gasification.

WPROWADZENIE

Drewno, oprócz węgla kamiennego, może być liczącym się nośnikiem energii dla niektórych grup odbiorców. Istnieje wiele sposobów wykorzystywania drewna do celów energetycznych. Oprócz bezpośredniego, tradycyjnego spalania drewna, stosuje się spalanie gazu procesowego uzyskanego w wyniku przetwarzania drewna w procesie jego zgazowania (pirolitycznego lub w termogeneratorach) (Guzena, Świgoń 1997; Szczukowski, Stolarski 1999; Rosik-Dulewska 2000).

W artykule omówiono proces niskotemperaturowego zgazowania odpadów drewnopochodnych (Orszulik, Jachyra, Bieniasz 2005). Scharakteryzowano produkty zgazowania, a szczególnie (gaz procesowy) pod kątem jego przydatności jako paliwa uzupełniającego wsad węgla kamiennego spalane w energetyce (gorąca woda lub para wodna). W procesie współspalania węgla i gazu, udział gazu może wynosić około 45%, a udział węgla około 55%, co odpowiada mocy kotła zawartej w ilości energii wprowadzanej do źródła w jednostce czasu, przy jego nominalnym obciążeniu.

1. WŁAŚCIWOŚCI CHEMICZNE ODPADÓW DREWNOPOCHODNYCH

Właściwości chemiczne odpadów drewnopochodnych, pod kątem ich wykorzystania w procesach energetycznych, określono na próbkach pochodzących z przemysłu meblarskiego, budowlanego, z zakładów stolarskich, a także z sortowni i składowisk odpadów komunalnych. Były to: trociny, wióry, ścinki, płyty wiórowe i zrębki drewniane. Oznaczono ich wartość opałową Q_i^r , zawartość popiołu A^r , siarki całkowitej S_i^r i wilgoci całkowitej W_i^r oraz zawartość węgla pierwiastkowego C_i^a , wodoru H_i^a , chloru Cl^a , azotu N^a i części lotnych V^a . Wyniki przedstawiono w tabelicy 1.

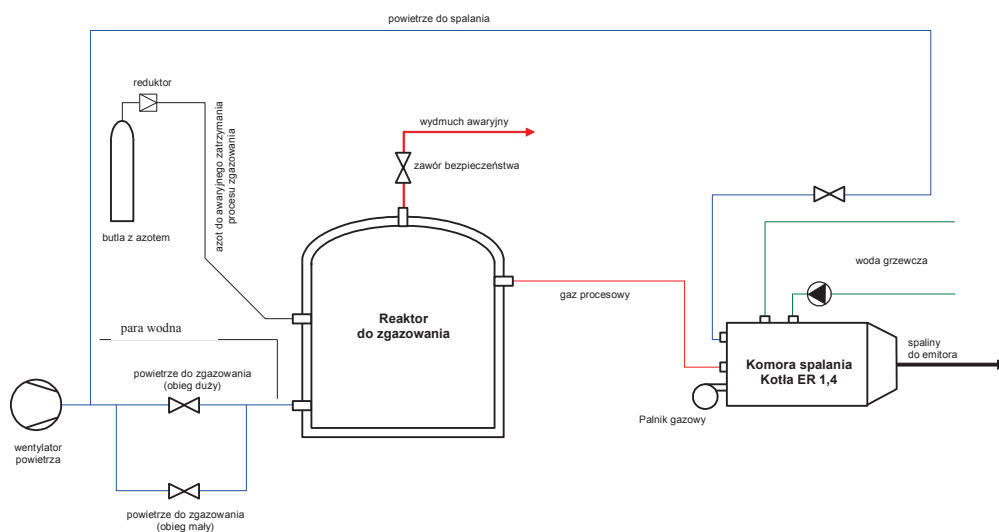
Tablica 1. Właściwości chemiczne odpadów drewnopochodnych

Numer próbki	Rodzaje oznaczeń								
	Q_i^r kJ/kg	A^r %	S_i^r %	W_i^r %	C_i^a %	H_i^a %	Cl^a %	N^a %	V^a %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	15250	4,05	0,04	10,15	45,38	6,18	0,053	4,04	68,91
2	15854	4,25	0,03	7,67	44,10	6,12	0,027	3,83	69,32
3	16574	1,20	0,03	6,91	46,49	4,86	0,022	1,76	74,11
4	16692	0,73	0,01	5,72	45,92	5,25	0,018	5,46	73,69
5	16402	0,54	0,02	7,07	46,54	6,47	0,036	2,19	74,34
6	11039	1,12	0,02	31,35	47,95	7,87	0,163	–	72,24
7	11134	0,74	0,02	29,51	44,58	6,07	0,090	–	82,49
8	16522	1,76	0,03	7,44	45,01	5,78	0,040	–	72,80

Z powyższej charakterystyki wynika, że największą wartość opałową, tj. 16692 kJ/kg, miała próbka 4, a najmniejszą – 11039 kJ/kg – próbka 6. Zawartości wilgoci w tych próbkach wynosiły kolejno 5,72 i 31,35%. Im więcej wody zawierały odpady, tym mniejsza była ich wartość opałowa. Zawartości węgla pierwiastkowego we wszystkich próbkach były duże i porównywalne. Próbki charakteryzowały się także dużymi zawartościami części lotnych. Stwierdzono, że im więcej części lotnych, tym szybciej następuje zapłon odpadów i wydziela się więcej gazów, polepszając warunki spalania paliwa. Wszystkie próbki odpadów drewnopochodnych charakteryzowały się korzystnie bardzo małymi zawartościami siarki i popiołu.

2. OPIS TECHNOLOGII ZGAZOWANIA ODPADÓW DREWNOPOCHODNYCH

Schemat technologiczny instalacji do zgazowania odpadów drewnopochodnych przedstawiono w uproszczony sposób na rysunku 1. W skład instalacji wchodzi:



Rys. 1. Schemat instalacji do zgazowania odpadów drewnopochodnych

Fig. 1. Scheme of installation for wood derivative wastes gasification

- Reaktor w kształcie pionowego walca z płaszczem wyłożonym wykładziną termiczną, od góry jest zamykany kłapą bezpieczeństwa, a z boku wyposażony w szczelnie zamykane drzwi, przez które są podawane odpady. Odpady są załadowywane w specjalnym koszu na płaski ruszt, który znajduje się w dolnej części reaktora powyżej rurociągu doprowadzającego powietrze i parę wodną. Pojemność reaktora wynosi od 350 do 400 kg odpadów na szarżę. Z tej ilości odpadów otrzymuje się około 600 m³ gazów.
- Kocioł wodny typu ER 1,4, w którym następuje spalanie gazu procesowego i węgla kamiennego. W kotle są zainstalowane kolektory doprowadzające gaz procesowy i powietrze do spalania oraz palnik gazowy inicjujący proces spalania. W opisywanej instalacji zastosowano typowy dla kotłów grzewczych palnik gazowy o mocy 550 kW. Spaliny ze spalania gazu procesowego odprowadza się bezpośrednio do emitora stalowego.
- Wentylator nawiewu służący do doprowadzenia powietrza niezbędnego do procesu zgazowania odpadów oraz powietrza do spalania gazu procesowego w palniku. Wydajność nawiewu zawiera się w przedziale 0,15–3,5 m³/godzinę. Regulacja wydatku powietrza odbywa się przy użyciu przepustnic ręcznych.
- Butle z ciekłym azotem, stanowiące środek stosowany w stanach awaryjnych:
 - h zatrzymania lub zatrzymania procesu zgazowania.

Proces zgazowania odpadów drewnopochodnych można podzielić na trzy fazy:

- fazę podgrzewania i rozpalania odpadów,
- fazę zgazowania,
- fazę dopalania odpadów.

Cały proces zgazowania odpadów drewnopochodnych jest procesem cyklicznym. Rozpoczyna się od ręcznego układania, na płaskim ruszcie reaktora, odpadów drewnopochodnych, które się następnie podpala. Jest to faza podgrzewania i rozpadania odpadów. Palące się odpady osiągają temperaturę 350–750°C. W wyniku ich spalania w atmosferze reaktora zbierają się spaliny, które zawierają CO, CO₂, NO₂, SO₂. Gazy te są od razu kierowane do komory spalania kotła wodnego typu ER 1,4. Faza podgrzewania trwa około 15 minut. Po tym czasie obniża się temperaturę we wnętrzu reaktora przez ograniczenie do niego dopływu powietrza. Po ustabilizowaniu się temperatury 350–200°C rozpoczyna się faza zgazowania odpadów drewnopochodnych. Prowadzi się ją w atmosferze mieszaniny powietrza (zawierającego do 5 lub 10% tlenu) i gazów wydzielonych w procesie podgrzewania odpadów oraz pary wodnej (przy strumieniu masy $\dot{m} = 18$ kg/godzinę, ciśnieniu pary $p_p = 0,05$ MPa i jej temperatury $t_p = 160^\circ\text{C}$), wytworzonej w kotle parowym typu NKP 05/60, opalonym węglem kamiennym. Parę wodną doprowadza się dodatkowo, aby uzyskać możliwie największą ilość gazów palnych.

Zachodzące w procesie zgazowania reakcje można przedstawić w uproszczony sposób:



Są to reakcje endotermiczne, w wyniku których, przy udziale pary wodnej i dwutlenku węgla, powstaje gaz procesowy zawierający palne produkty zgazowania węgla pierwiastkowego, zawartego w odpadach, takie, jak: wodór, tlenek węgla, metan oraz węglowodory: etylen i etan oraz niepalne gazy takie, jak dwutlenek węgla i azot.

Ciepło zapewniające prawidłowy przebieg procesu jest pobierane z ciągle żarzących się na ruszcie reaktora odpadów drewnopochodnych. Gaz procesowy jest odprowadzany sukcesywnie do komory spalania kotła wodnego typu ER 1,4. Proces zgazowania trwa około 5 godzin. Po upływie tego czasu rozpoczyna się ostatnia faza procesu zgazowania – faza dopalania odpadów, gdyż na ruszcie reaktora pozostają odpady, które zawierają 89,85% części palnych. Zwiększa się dopływ powietrza do reaktora, aby proces mógł przebiegać w temperaturze 650–950°C. W wyniku spalania pozostałości po zgazowaniu wydzielają się popioły zawierające 9,44% części palnych.

3. CHARAKTERYSTYKA GAZU PROCESOWEGO

W celu scharakteryzowania gazu procesowego uzyskanego w wyniku zgazowania odpadów drewnopochodnych, próbki do badań pobierano we wszystkich trzech fazach procesu. Skład gazu procesowego przedstawiono w tabelicy 2. Symbolem FP oznaczono gazy wydzielone w fazie podgrzewania odpadów, FZ w fazie ich zgazowania, a FD w fazie dopalania.

Przydatność gazu procesowego do spalania określa się na podstawie jego wartości opałowej. Wartości opałowe gazów palnych wchodzących w skład gazu procesowego

obliczono wykorzystując dane zawarte w tabelcy 2. Wyniki przedstawiono w tabelcy 3 w kolumnach 3–7. W kolumnie 8 podano sumaryczną wartość opałową gazu procesowego przy zawartościach tlenu ujętych w kolumnie 4 tabelcy 2. Wartości opałowe przedstawione w kolumnach 9 i 10 zostały obliczone w odniesieniu do zawartości tlenu i azotu 0%.

Tabela 2. Skład gazu procesowego

Lp.	Próbka	Rodzaje gazów							
		H ₂	O ₂	CH ₄	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	N ₂
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	FP 1	0,13	15,5	0,34	5,70	0,09	0,03	1,57	76,6
2	FP 2	0,15	12,5	0,00	8,50	0,08	0,04	2,87	75,8
3	FP 3	2,01	8,5	1,22	5,70	0,57	0,11	3,98	77,2
4	FP 4	2,57	10,5	1,39	6,99	0,51	0,11	3,96	73,9
5	FP 5	3,95	6,9	2,01	8,24	0,66	0,16	5,71	72,3
6	FZ 1	4,16	5,9	1,87	9,48	0,58	0,17	7,35	70,5
7	FZ 2	8,60	8,9	3,08	9,14	0,28	0,28	8,53	61,19
8	FZ 3	7,50	8,5	4,18	8,54	1,58	0,30	10,58	58,82
9	FZ 4	1,56	8,4	1,01	17,62	0,55	0,11	3,29	67,46
10	FZ 5	1,77	7,8	1,51	18,58	0,71	0,21	3,15	66,3
11	FD 1	0,53	11,3	0,558	6,66	0,36	0,038	2,16	78,4
12	FD 2	0,03	5,6	0,005	12,96	0,00	0,00	0,66	80,74
13	FD 3	0,31	13,7	1,20	11,44	0,13	0,13	3,58	69,51
14	FD 4	1,65	6,1	1,43	15,14	0,40	0,15	4,22	71,3
15	FD 5	1,05	10,8	0,07	7,9	0,43	0,17	3,5	76,08

Z danych zawartych w tabelcy 3 wynika, że gaz procesowy otrzymany w wyniku zgazowania odpadów drewnopochodnych charakteryzuje się wartością opałową od 5547,81 do 23883,45 kJ/kg paliwa. Korzystne pod względem ekonomicznym są próbki gazu procesowego, charakteryzujące się wartością opałową przekraczającą 19000 kJ/kg (kolumna 10, tabl. 2).

Tabela 3. Wartości opałowe gazu procesowego i jego składników

Lp.	Próbka	H ₂ kJ/kg	CH ₄ kJ/kg	CO kJ/kg	C ₂ H ₄ kJ/kg	C ₂ H ₆ kJ/kg	Sumaryczna wartość opałowa gazu kJ/kg	Sumaryczna wartość opałowa gazu tlen = 0% kJ/kg	Sumaryczna wartość opałowa gazu azot = 0% kJ/kg
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	FP 1	13,86	120,17	195,73	52,49	18,88	401,13	1532,33	13203,86
2	FP 7	123,67	660,94	916,32	338,26	107,00	2146,19	2984,76	19946,94
3	FP 10	153,52	338,95	509,90	256,61	75,53	1334,51	1708,17	19523,39
4	FP 17	159,91	159,05	561,01	145,80	44,06	1069,84	1604,75	10061,59
5	FP 18	142,85	201,46	461,28	174,96	37,77	1018,32	1720,96	9634,40
6	FZ 4	166,31	356,98	410,16	320,76	69,24	1323,45	2210,16	9065,63
7	FZ 5	188,70	533,70	392,71	414,07	132,18	1661,36	2641,56	10333,66
8	FZ 10	886,98	353,45	544,81	542,38	302,12	2629,73	3576,43	16069,52
9	FZ 11	876,32	1109,82	567,25	285,77	144,77	2983,92	4833,95	23883,45
10	FZ 21	889,11	1074,47	484,97	390,75	226,59	3065,88	4506,85	14243,06
11	FD 4	175,90	505,43	526,11	233,28	94,41	1535,13	2164,53	15750,0
12	FD 10	59,70	388,79	336,61	69,98	56,02	911,10	1384,87	8207,17
13	FD 13	4,26	346,38	167,06	139,97	81,83	739,49	1782,17	9229,02
14	FD 15	138,59	24,74	112,20	209,95	56,65	542,14	1035,48	5547,81
15	FD 16	104,48	282,76	199,47	209,95	75,53	872,19	1604,82	9623,33

4. SPALANIE GAZU PROCESOWEGO

Otrzymany w wyniku zgazowania odpadów drewnopochodnych gaz procesowy jest kierowany do palnika usytuowanego w kotle wodnym typu ER 1,4. Gaz zapala się od węgla kamiennego żarzącego się na ruszcie tego kotła i w ten sposób obydwoma paliwami ogrzewa się wodę do celów ciepłowniczych. Z 400-kilogramowej szarży odpadów otrzymuje się około 600 nm³/h gazów.

Całkowite spalanie tych gazów obrazują stechiometryczne równania reakcji:



Biorąc pod uwagę powyższe reakcje, a także skład powietrza atmosferycznego zawierającego azot i tlen oraz gazów wydzielających się w procesie zgazowania odpadów, można obliczyć teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania gazu procesowego, a mianowicie: do spalania 765 kilogramów tlenku węgla potrzeba 1919 kg powietrza, a do spalania 31 kg wodoru – 1087 kg powietrza.

W celu wyeliminowania skutków niedoskonałego wymieszania paliwa z powietrzem, powietrze do komory spalania doprowadza się w nadmiarze. Przy założeniu, że współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,2$, rzeczywista ilość powietrza wilgotnego potrzebna do spalania gazu procesowego powinna wówczas wynieść

$$m_{pw} = 1,2(1919 + 1087) = 3607 \text{ kg}$$

5. CHARAKTERYSTYKA ODPADÓW STAŁYCH I GAZOWYCH WYDZIELONYCH W PROCESIE ZGAZOWANIA

Po zakończeniu procesu zgazowania pozostają niedopalone odpady drewnopochodne (pozostałość po zgazowaniu) o zawartości części palnych 89,85%. Po dopaleniu pozostałości po zgazowaniu, wydzielają się popioły o zawartość części palnych 9,44%. Ilości tych popiołów nie przekraczają 10% masy odpadów drewnopochodnych przeznaczonych do zgazowania.

Średnie zawartości pierwiastków śladowych w odpadach przed i po dopaleniu są podobne (tabl. 4).

Tablica 4. Zawartości pierwiastków śladowych w odpadach

Pierwiastki śladowe	Zawartości	
	w pozostałości po zgazowaniu	w popiele
Cd	<0,2 ppm	2 ppm
Cr	95 ppm	103 ppm
Cu	145 ppm	269 ppm
Hg	–	< 0,08 ppm
Mn	8606 ppm	6313 ppm
Ni	547 ppm	160 ppm
Pb	49 ppm	25 ppm
Zn	830 ppm	734 ppm

Analiza chemiczna wyciągu wodnego po wykonaniu testu wymywalności pozostałości po zgazowaniu wskazała, że odpady te w wyniku składowania nie będą zmieniały środowiska wodnego otoczenia. Zawartość substancji rozpuszczalnych wynosiła zaledwie 133 mg/dm³, a ChZT 58,7 mg/dm³. Odczyn PH tego wyciągu miał wartość 6,45. Zawartość pierwiastków śladowych była nieznaczna (poniżej granicy oznaczalności). Odpady stałe wydzielone w procesie zgazowania odpadów drewnopochodnych nie należą do niebezpiecznych i można je gospodarczo wykorzystywać, na przykład w drogownictwie do produkcji kostki brukowej.

W wyniku spalania gazu procesowego są wydalone do atmosfery pyły i spaliny. Wykonane pomiary i obliczone na ich podstawie emisje pyłów i gazów spalinowych przedstawiają się następująco:

• pył zawieszony	30 mg/m ³ ,
• substancja organiczna w postaci gazów i par wyrażona jako całkowity węgiel organiczny	20 mg/m ³ ,
• chlorowodór	60 mg/m ³ ,
• fluorowodór	4 mg/m ³ ,
• dwutlenek siarki	200 mg/m ³ ,
• tlenek węgla	100 mg/m ³ ,
• dwutlenek azotu	400 mg/m ³ ,
• metale ciężkie i ich związki wyrażone jako metal:	
• Cd + Tl	0,05 mg/m ³ ,
• Hg	0,05 mg/m ³ ,
• Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V + Sn	0,5 mg/m ³ .

Powyższe dane wykazują, że w wyniku procesu zgazowania wydzielają się pyły i spaliny w ilościach nieznacznych i mieszczących się w standardach emisyjnych zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 4 sierpnia 2003 roku w sprawie standardów emisyjnych z instalacji (Dz. U. 03.163.1584).

PODSUMOWANIE

Niskotemperaturowe zgazowanie odpadów drewnopochodnych należy do inwestycji proekologicznych. Jest to proces termicznego unieszkodliwiania odpadów stałych, połączony z wykorzystaniem ich właściwości energetycznych. Przebiega w trzech fazach różniących się temperaturą panującą wewnątrz reaktora. W wyniku procesu zgazowania wydziela się gaz procesowy, w skład którego wchodzi gazy palne takie, jak: wodór, tlenek węgla, metan, etan, etylen oraz gazy niepalne, tj. dwutlenek węgla i azotu oraz para wodna. Wartość opałowa gazu procesowego mieści się w granicach od 5547,81 do 23883,45 kJ/kg paliwa. Pod względem ekonomicznym jest korzystny gaz procesowy charakteryzujący się wartością opałową przekraczającą 19000 kJ/kg paliwa.

Zgazowanie odpadów drewnopochodnych i spalanie gazu procesowego wiąże się z wydzieleniem pyłów, spalin oraz odpadów stałych. Otrzymane w wyniku spalania tego gazu spaliny charakteryzują się składem umożliwiającym ich emisję do powietrza

jedynie po odpyleniu bez dodatkowego oczyszczania chemicznego. Odpady stałe wydzielane są w ilościach nieznacznych i nie przekraczają 10% masy odpadów drewnopochodnych przeznaczonych do zgazowania.

Literatura

1. Guzena R., Świgoń J. (1997): *Techniczne i ekologiczne aspekty energetycznego wykorzystania drewna i odpadów drzewnych*. Gospodarka Paliwami i Energią nr 1.
2. Orszulik E., Jachyra J., Bieniasz T. (2005): *Współspalanie węgla z gazem ze zgazowania odpadów drewnopochodnych z przemysłu meblarskiego w kotle rusztowym*. Prace IMiUE Politechniki Śląskiej: VII Konferencja Naukowo-Techniczna 2005 „Kotły rusztowe jako jednostki wielopaliwowe”.
3. Rosik-Dulewska Cz. (2000): *Podstawy gospodarki odpadami*. Warszawa, PWN.
4. Szczukowski S., Stolarski M. (1999): *Energia cieplna z biomasy wierzb krzewiastych*. Prace Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.

Recenzent: prof. dr hab. Jerzy Sablik
