



## Tests of basic fueling properties of polyolefin wastes

Monika CZOP<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Katedra Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów, tel. 32 237 21 04, [Monika.Czop@polsl.pl](mailto:Monika.Czop@polsl.pl)

### Abstract

European Union set goals concerning saving energy and climate protection, which need to be realized by 2020. Their main purpose is to limit emission of greenhouse gases in EU about at least 20% in relation to the 90s of the previous century. This goal shall be realized by increasing use of energy from renewable sources to 20% and decreasing consumption of energy about 20% in relation to the assumed levels.

In the last ten years, use of plastics increases constantly, resulting in a 3% raise of the post-consumer wastes. Polymers waste may significantly contribute to the realization of the goals related to decrease of emission, because polymers singled out from the stream of municipal waste may be processed into fuel which could be used in industrial plants, such as cement plant or lime production factories.

The article presents basic properties of fuels from selected polymer wastes. Polymers used for tests are widely used in many fields of life, ex. in house-building, automotive industry, gardening, medicine and packaging.

**Keywords:** waste, polymers, recycling, energy recovery

### Streszczenie

Badania podstawowych właściwości paliwowych odpadów poliolefinowych.

Unia Europejska wyznaczyła cele dotyczące oszczędzania energii i ochrony klimatu, które mają zostać zrealizowane do 2020 r. Głównym celem jest zmniejszenie poziomu emisji gazów cieplarnianych w UE o co najmniej 20% w stosunku do lat 90 ubiegłego wieku. Realizacja tego celu ma nastąpić poprzez zwiększenie ilości zużywanej energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych do 20% oraz zmniejszenie zużycia energii o 20% w stosunku do zakładanych poziomów.

W ciągu ostatniego dziesięciolecia zużycie tworzyw sztucznych nieprzerwalnie wzrasta, powodując 3%-owy wzrost ilości odpadów pokonsumenckich. Odpadowe polimery mogą wnieść duży wkład w realizację celów związanych z obniżeniem emisji, gdyż wysegregowane ze strumienia odpadów komunalnych mogą być przetwarzane w paliwo, które może być wykorzystywane w zakładach przemysłowych, takich jak cementownie czy zakłady produkcji wapna.

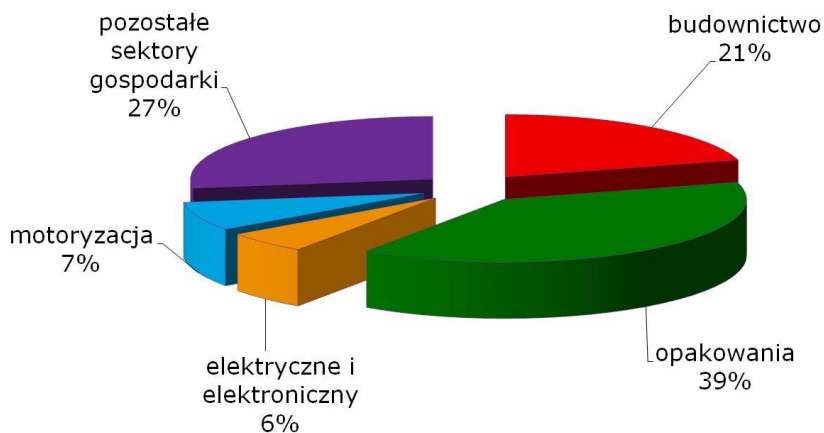
W artykule zaprezentowano podstawowe właściwości paliwowe wybranych odpadów polimerowych. Do badań wybrano polimery mające powszechne zastosowanie w różnych dziedzinach życia np. w budownictwie mieszkaniowym, motoryzacji, ogrodnictwie, medycynie i opakowalnictwie.

**Słowa kluczowe:** odpady, polimery, recykling, energetyczne wykorzystanie odpadów

### 1. Wstęp

Tworzywa sztuczne znajdują bardzo szerokie zastosowanie we wszystkich branżach przemysłu. Branża tworzyw sztucznych odgrywa ważną rolę z punktu widzenia wzrostu gospodarczego, dzięki innowacjom w wielu sektorach europejskiej gospodarki, m.in. w motoryzacji, przemyśle elektrycznym i elektronicznym, budownictwie oraz produkcji żywności i napojów. W dalszym ciągu największym segmentem zastosowania tworzyw są opakowania, ich rynkowy udział to 39%. Udział ten jest jednak mniejszy, niż rok wcześniej (40,1%), co wynika z szybszego rozwoju w 2010 roku w porównaniu z 2009 r. zastosowań o charakterze technicznym. Za branżą opakowaniową znalazły się kolejno: budownictwo (20,6%), motoryzacja (7,5%) oraz przemysł

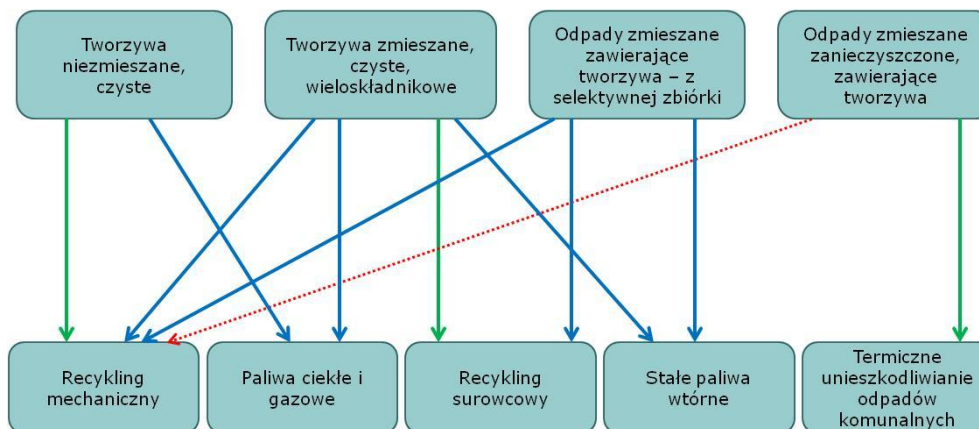
elektryczny i elektroniczny (5,6%). Pozostałe segmenty zastosowań to sport, zdrowie i bezpieczeństwo, rozrywka i wypoczynek, rolnictwo, budowa maszyn, produkcja urządzeń AGD oraz meble (Rys.1.1) [1-5].



Rys.1.1. Zastosowanie tworzyw sztucznych [11].

Dzięki swoim różnorodnym i unikalnym właściwościom chemicznym i fizycznym oraz możliwością dowolnego ich modyfikowania za pomocą różnych dodatków tworzywa mają niemal nieograniczone możliwości użycia. Ta różnorodność właściwości tworzyw niestety komplikuje sprawę gdy stają się odpadem i poszukuje się metod ich ponowne zagospodarowanie.

Większość obecnie działających technologii, np. recyklingu potrzebuje jednorodnego polimeru jako surowca wtórnego. Frakcja odpadowa tworzyw sztucznych ze względu na zabrudzenia oraz niejednorodność, nie kwalifikuje się do recyklingu i jest jak na razie głównie deponowana na składowiskach odpadów komunalnych (Rys.1.2). Jednak zawarty w odpadowych tworzywach potencjał energetyczny skłania do wykorzystywania ich w procesach termicznych. Odpadowe tworzywa mogą być wykorzystywane jako stałe paliwo wtórne [6-13].



Rys.1.2. Sposoby recyklingu i odzysku różnych frakcji odpadowych tworzyw sztucznych [7]

Dodatковым argumentem przemawiającym za energetycznym wykorzystaniem odpadów polimerowych (zmieszanych i zabrudzonych) jest fakt, że zgodnie z rozporządzeniem Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 7 września 2005 r. w sprawie kryteriów i procedur dopuszczenia odpadów do składowania na składowiskach danego typu (Dz. U. Nr 186, poz. 1553 z późn. zm.), od 1 stycznia 2013 roku nie można składować odpadów komunalnych o następujących parametrach:

- ogólny węgiel organiczny (TOC) powyżej 5%,
- strata przy prażeniu powyżej 8%,

- ciepło spalania powyżej 6 MJ/kg.

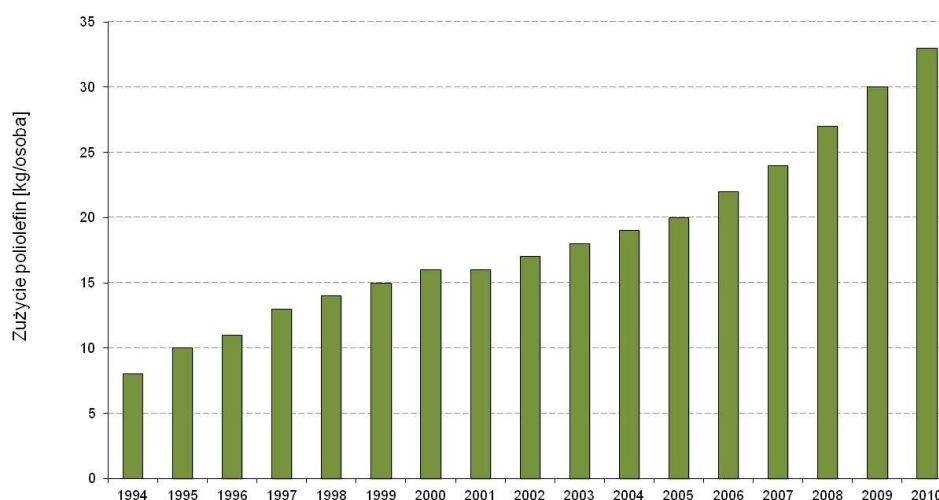
Regulacja ta ma na celu między innymi wyeliminowanie ze składowania odpadów komunalnych niesegregowanych (zmieszanych) o kodzie 20 03 01, jak również ograniczenie dotyczące składowania pozostałości z sortowania odpadu o kodzie 19 12 12 (inne odpady, w tym zmieszane substancje i przedmioty z mechanicznej obróbki odpadów inne niż wymienione w 19 12 11).

Obecnie szacuje się, że wśród odpadów komunalnych tworzywa sztuczne stanowią od 7 do 14 % ogólnej masy odpadów, co może stanowić nawet 30 % ich objętości. Ocenia się, że w Polsce powstaje rocznie około 800 tys. Mg odpadów tworzyw sztucznych. Według danych z GUS-u w roku 2011 w Polsce ogółem powstało 784474 Mg opakowań z tworzyw sztucznych [6-11].

Do „wielkiej piątki” tworzyw, które odznaczają się największymi udziałami rynkowymi, należą: polietylen (PE), polipropylen (PP), polichlorek winylu (PVC), polistyren (stały i spieniony), politereftalan etylenu (PET).

Trzy główne grupy polimerów w rozbiciu na udziały rynkowe to: polietylen (29%), polipropylen (19%) oraz polichlorek winylu (12%). Łącznie na powyższe polimery przypada około 60% całego zapotrzebowania na tworzywa sztuczne w Europie [11].

Jedną z podstawowych grup tworzyw sztucznych są poliolefiny. Są to polimery termoplastyczne produkowane z ropy naftowej. Poliolefiny to polimery zawierające w swej budowie głównie węgiel i wodór, w których występują długie łańcuchy węglowe -C-C-C-, stanowiące podstawowy szkielet łańcuchów samych polimerów. W grupie tej podstawowymi tworzywami są polietylen (PE) i polipropylen (PP). Wśród tworzyw sztucznych zajmują one czołowe miejsce w świecie pod względem wielkości produkcji. W 2006 roku w Polsce zużycie poliolefin wynosiło ok. 22 kg na osobę, w 2008 roku wartość to wzrosła o 4 kg na osobę, a w roku 2010 poziom wyniósł już ok. 33 kg na osobę (Rys.1.3) [6-11].



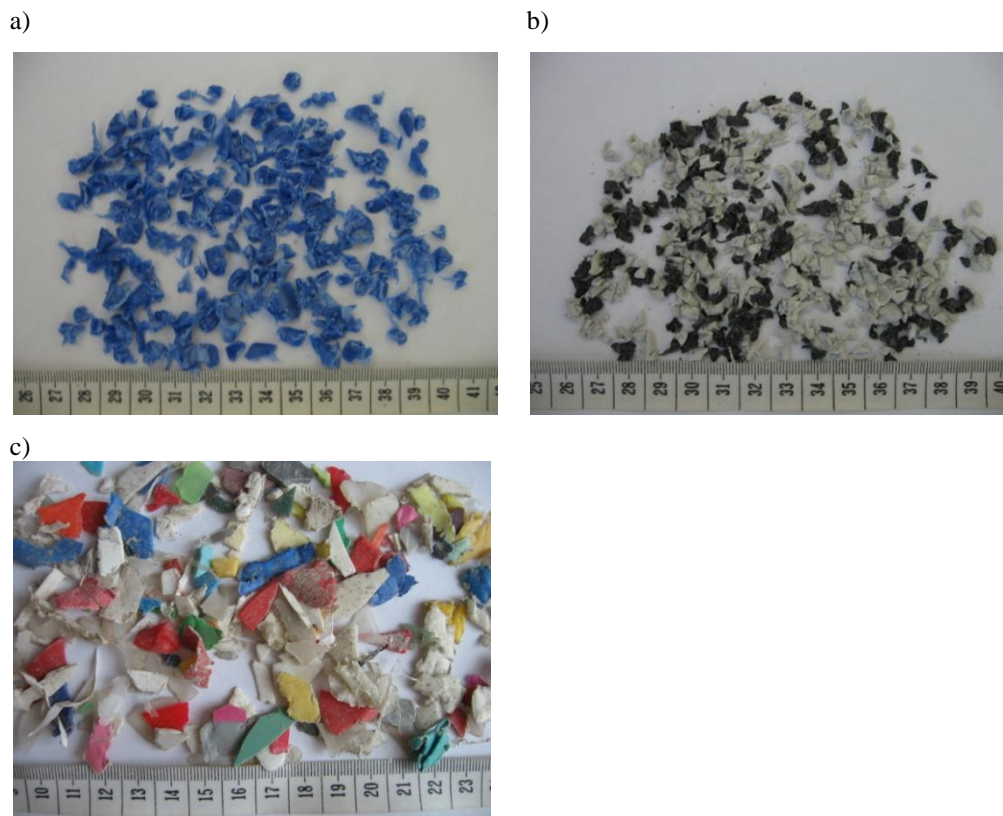
Rys. 1.3. Zużycie poliolefin w Polsce [6].

Poliolefiny nie mają zapachu ani smaku, nie są toksyczne, nie rozpuszczają się w wodzie, są odporne chemicznie i są łatwe w obróbce, o niskiej gęstości ( $0,9 \text{ g/cm}^3$ ) oraz tanie. Cechy te przyczyniły się do ich ogromnej popularności.

## 2. Charakterystyka badanych odpadów

Do badań wybrano trzy rodzaje odpadów poliolefinowych. Wybór odpadów został podyktowany ich powszechnym zastosowaniem w różnych dziedzinach życia np. w budownictwie mieszkaniowym, ogrodnictwie, medycynie, motoryzacji i gospodarstwie domowym. Analizie właściwości paliwowych poddano następujące odpady:

- odpad polietylenu, pochodzący ze strumienia odpadów remontowo-budowlanych (Rys. 2.1.a),
- odpad polipropylenu, pochodzący ze strumienia odpadów remontowo-budowlanych (Rys. 2.1.b),
- mieszaninę odpadów PP i PE z selektywnej zbiórki strumienia odpadów komunalnych (Rys. 2.1.c).



Rys. 2.1. Odpady polimerowe zastosowany w badaniach a) polietylen (PE), b) polipropylen (PP), c) mieszanina PE – PP wysegregowanych z odpadów komunalnych (wyk. M. Czop).

### 3. Metodyka prowadzenia badań

Celem badań było określenie podstawowych właściwości paliwowych odpadów polimerowych pod kątem możliwości ich energetycznego wykorzystania. Zakres badań odpadów polimerowych obejmował następujące oznaczenia [14-23]:

- wilgotność całkowita ( $W$ ),
- części palne i lotne,
- zawartość popiołu ( $A$ ),
- ciepło spalania ( $W_g$ ),
- obliczenie wartości opałowej ( $W_d$ ),
- skład pierwiastkowy (C, H, S, N, Cl, O),
- zawartość metali ciężkich (Zn, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Co).

Obróbkę wstępną odpadów polimerowych stanowiło rozdrobnienie do uziarnienia analitycznego.

Wszystkie oznaczenia zostały przeprowadzone zgodnie z obowiązującymi normami, a każde oznaczenie zostało kilkakrotnie powtórzone [14-23].

#### 4. Wyniki badań

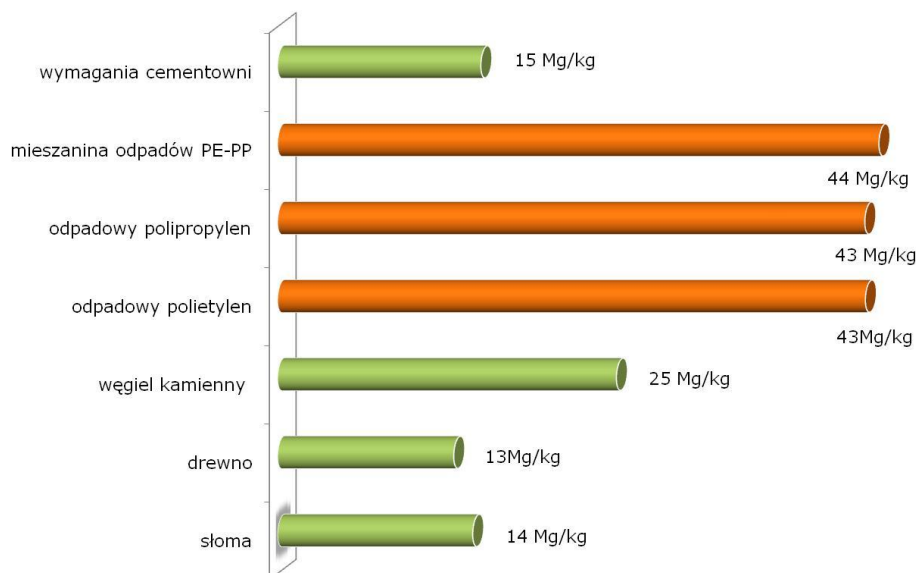
Energetyczne właściwości paliwowe badanych poliolefin mogą dotyczyć wielu parametrów, jednak za najważniejsze należy uznać skład elementarny, zawartość popiołu, a przede wszystkim zawartość wilgoci oraz wartości opałowej (Tabela 4.1).

Tabela 4.1. Podstawowe właściwości paliwowe wybranych odpadów polimerowych.

Parametr	Jednostka	Odpady poliolefinowe		
		PE	PP	PE – PP
Wilgotność	%	0,13	0,09	0,03
Ciepło spalania	MJ/kg	46,87	46,78	47,52
Wartość opałowa	MJ/kg	43,37	43,33	44,37
Zawartość części lotnych	%	94,24	98,78	99,13
Zawartość części palnych	%	99,30	98,78	99,10
Zawartość popiołu	%	0,57	1,13	0,86

Zawartość wilgoci jest jednym z podstawowych parametrów określającym przydatność paliwa od celów energetycznych gdyż wilgotność wpływa na przebieg procesu spalania, powodując powiększenie objętościowego strumienia spalin. Wilgoć w paliwach stałych zawiera się w dość szerokich granicach: od 5÷30% dla węgla kamiennego, do 60% dla węgla brunatnego. Duża wilgotność jest poważną wadą paliwa ponieważ utrudnia zapłon, obniża wartość opałową oraz może przyczyniać się do powstawania kwasów w kanałach kotła. Badane odpady poliolefinowe charakteryzują się niską wilgotnością, jest to wartość poniżej 1%.

Wielkością charakterystyczną dla każdego paliwa jest jego wartość opałowa, która zależy od rodzaju i ilości składników palnych oraz zawartości wilgoci. Wartość opałowa stanowi podstawę oceny jakości paliwa jako potencjalnego surowca energetycznego. Analizowane odpady poliolefinowe charakteryzują się wysoką wartością opałową, rzędu 43 MJ/kg. Dla porównania paliwa kopalne np. węgiel kamienny charakteryzuje się wartością opałową rzędu 16,7-32,7 MJ/kg (Rys.4.1).

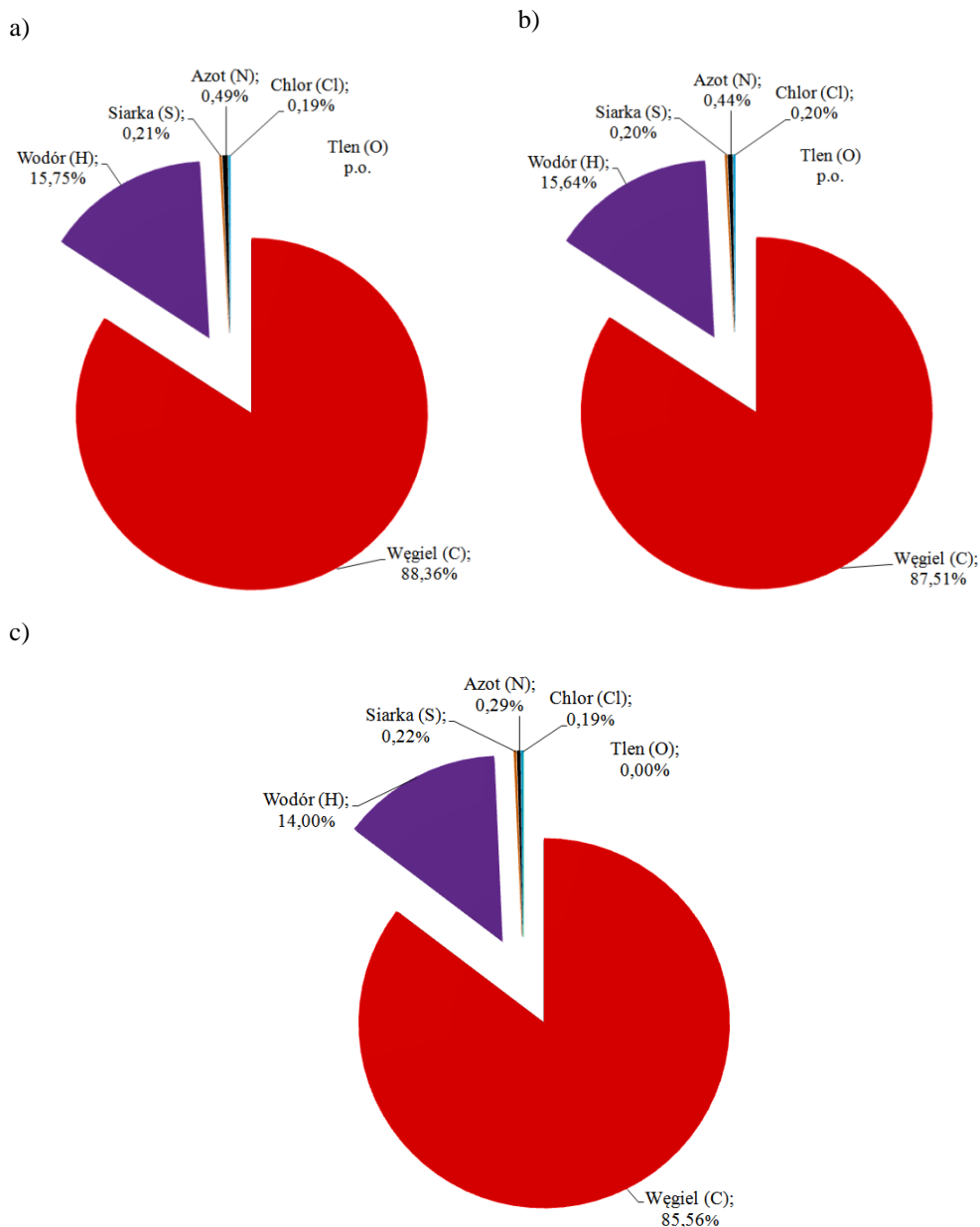


Rys. 4.1. Wartość opałowa wybranych surowców [7].

Z ekologicznego punktu widzenia zawartość popiołu jest istotnym elementem paliwa gdyż w jego składzie znajdują się metale ciężkie. Popiół powstały przy spalaniu paliw stałych składa się przede wszystkim ze związków krzemu ( $\text{SiO}_2$ ), glinu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) i wapnia ( $\text{CaO}$ ) oraz niedużych ilości związków żelaza. Badane odpady

charakteryzują się stosunkowo niską zawartością popiołu gdyż jest to wielkość zawarta w przedziale 0,57 – 1,13%.

Zawartość części lotnych należy do bardzo charakterystycznych cech paliw stałych. Złożone są one z produktów gazowych i par smołowych, tworzących się wskutek termicznego rozkładu paliwa stałego bez dostępu powietrza. Paliwa stałe o dużej ilości części lotnych dają podczas procesu spalania długi płomień oraz wymagają doprowadzenia dodatkowych ilości powietrza w celu zupełnego bezdymnego spalania. Udział części lotnych decyduje równocześnie o przebiegu procesu spalania paliwa, między innymi o łatwości zapłonu. Paliwa z małą zawartością części lotnych trudniej się zapalają. Analizowane poliolefiny charakteryzują się dużą zawartością części lotnych, jest to wielkość powyżej 94%.



Rys. 4.2. Skład pierwiastkowy badanych odpadów polimerowych a) polietylen (PE), b) polipropylen (PP), c) mieszanina PE – PP wysegregowanych z odpadów komunalnych.



Na rysunku 4.2 zamieszczono wyniki badań składu elementarnego substancji palnej odpadowych poliolefin. Analiza składu elementarnego badanych poliolefin wykazała, że odpady składają się głównie z pierwiastka węgla, co jest zgodne z ich budową ponieważ należy one do związków polimerowych, które charakteryzują się długimi łańcuchami węglowymi  $-C-C-C-$ . Zawartość czystego węgla w paliwie decyduje o ilości ciepła wydzielonego podczas jego spalania. Zawartość węgla w badanych poliolefinach jest rzędu 85%.

Zawartość wodoru w paliwie jest niewielka ale bardzo ważna ze względu na wysokie ciepło spalania. Wodór decyduje m.in. o łatwości zapłonu danego paliwa. Zawartość wodoru w poliolefinach jest rzędu 14-15%.

Zawartość siarki w paliwie jest niepożądana, ponieważ w połączeniu z wodą tworzy kwas siarkowy i wywołuje korozję powierzchni ogrzewalnych kotła. Zawartość siarki w badanych odpadach jest poniżej 1%.

Zawartość azotu podobnie jak siarki w paliwie stałym jest niewielka, szacuje się, że jej zawartość jest rzędu do 2 % masy palnej. Azot bierze udziału w procesie spalania, stanowi balast. Zawartość azotu w badanych poliolefinach jest poniżej 0,5% masy palnej. Tlenki azotu oraz siarki przedostające się do atmosfery powodują powstawanie tzw. kwaśnych deszczy i degradację środowiska naturalnego.

Zawartość chloru w odpadowych poliolefinach została ustalona na poziomie 0,20%. Według kryterium EURITS dopuszczalna zawartość chloru w paliwach może wynosić do 0,5% [24].

Poszczególne metale ciężkie ze względu na różny charakter fizykochemiczny oraz swoje indywidualne właściwości, wykazują oddziaływanie w stosunku do innych składników materiału. Metale ciężkie, których gęstość jest większa od  $4,5 \text{ g/cm}^3$ , dzieli się na cztery grupy pierwiastków śladowych o różnym stopniu zagrożenia dla środowiska biologicznego[25]:

- pierwiastki o bardzo wysokim stopniu potencjalnego zagrożenia: Cd, Hg, Rb, Cu, Tl, Sn, Zn, Cr, Sb, Ag, Au, Pb, Cu,
- pierwiastki o wysokim stopniu potencjalnego zagrożenia: Bi, U, Mo, Ba, Mn, Tl, Fe, Se,
- pierwiastki o średnim stopniu potencjalnego zagrożenia: F, Be, V, Rb, Ni, Co, As, Li, Ge, In, B, Br, J, Cs, W, Al.
- pierwiastki o niskim stopniu potencjalnego zagrożenia: Sr, Zr, Ta, La, Nb [25].

Zawartość metali ciężkich w badanych odpadach układała się w następujący szeregach malejących wartości (Tabela 4.2):

- dla odpadu polietylenu –  $Cr > Ni > Co > Pb > Cu > Cd = Zn$ ,
- dla odpadu polipropylenu –  $Zn > Cr = Cu = Co = Pb = Ni > Cd$ ,
- dla odpadu z selektywnej zbiórki –  $Zn > Cd > Pb > Cu > Cr > Co = Ni$ .

Największą zawartość cynku posiadają odpady z selektywnej zbiórki, powyżej 798 mg/kg. Obecność cynku w tych polimerach może pochodzić między innymi ze stabilizatorów termicznych, które stosuje się w czasie przetwarzania polimerów wykazujących tendencje do rozkładu w temperaturach przetwarzania. Dodatkowo jego zawartość można przypisać modyfikatorom palności, a dokładnie mówiąc środkiem przeciwdymnym, których zadaniem jest zmniejszenie ilości dymu i szkodliwych produktów lotnych w czasie palenia. Zawartość cynku w odpadach PP i PE jest ok. 800 razy mniejsza niż w mieszaninie odpadów z selektywnej zbiórki.

W mieszaninie odpadów z selektywnej zbiórki odnotowano zawartość ołowiu na poziomie 19,93 mg/kg, natomiast w odpadzie z polietylenu zawartość tego metalu jest rzędu 9,90 mg/kg. Zawartość ołowiu w odpadach z polipropylenu była poniżej granicy oznaczalności.

Mieszanina odpadów z selektywnej zbiórki charakteryzuje się największą zawartością kadmu (55,21 mg/kg) z pośród badanych odpadów. Kadm może być dodawany do produktów z tworzyw sztucznych jako barwnik w postaci metaloorganicznych związków. Podstawowe zastosowanie kadmu dotyczy produkcji czerwonych, pomarańczowych i żółtych pigmentów, które są stosowane do produktów wytworzonych z polimerów. Pozostałe odpady posiadają znikomą zawartość tego metalu, poniżej 1,00 mg/kg.

Tabela 4.2. Zawartość metali ciężkich w badanych odpadach polimerowych.

Parametr	Odpady poliolefinowe		
	PE	PP	PE – PP
	mg/kg		
Cynk (Zn)	<1,10	2,00	798,09
Ołów (Pb)	<9,90	1,00	19,93
Kadm (Cd)	<1,10	0,20	55,21
Chrom (Cr)	<11,30	1,00	<11,30
Miedź (Cu)	<5,00	1,00	12,06
Nikiel (Ni)	<10,60	1,00	<10,60
Kobalt (Co)	<10,60	1,00	<10,60

Zawartość chromu w odpadach z polietylenu oraz mieszaninie z selektywnej zbiórki, jest na poziomie 11,30 mg/kg, w odpadzie polipropylenu zawartość chromu jest poniżej progu oznaczalności.

Największą zawartością miedzi charakteryzowała się mieszanina odpadów z selektywnej zbiórki (12,06 mg/kg), w odpadzie z polietylenu zawartość tego metalu odnotowano na poziomie 5,00 mg/kg. Natomiast w odpadzie polipropylenu zawartość miedzi jest poniżej progu oznaczalności.

Zawartość niklu i kobaltu w odpadzie z polietylenu oraz mieszaninie z selektywnej zbiórki, jest rzędu 10,60 mg/kg, natomiast zawartość tych dwóch metali (Ni i Co) w odpadzie polipropylenu jest poniżej progu oznaczalności.

## 5. Podsumowanie

Odpady poliolefinowe ze względu na masowość wytwarzania oraz skład chemiczny są bardzo atrakcyjnym surowcem do rozmaitych transformacji chemicznych, podejmowanych w celu redukcji ich ilości deponowanej na składowiskach. Analizując przebadane poliolefiny pod kątem ich energetycznego wykorzystania można wstępnie je zakwalifikować jako stałe paliwo wtórne.

Wstępnie można odpady poliolefinowe zaklasyfikować do procesu zgazowania, w którym otrzymuje się kaloryczny gaz syntetyczny (CO, H<sub>2</sub>).

## Literatura

1. Saechtling H. *Plastics. Handbook*, 5th edition. Scientific and Technical Publishing Warsaw 2000.
2. Czop M., Kozielska B. Physicochemical properties of waste mix from polyolefin group. *Archives of Waste Management and Environmental Protection*. VOL. 12 no. 1, 47-56, 2010.
3. Al-Salem S.M., Lettieri P., Baeyens J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW). *Waste Management*. Volume 29, Issue 10, 2625–2643, 2009.
4. Czop M., Biegańska J. Impact of selected chemical substances on the degradation of the polyolefin materials. *CHEMIK*, 66,4, , 2012.
5. Czop M., Kajda-Szcześniak M. Paliwa z odpadów źródłem energii odnawialnej. *Archives of Waste Management and Environmental Protection*. VOL. 15 no. 2, 83-92, 2013.
6. Mroziński A. Recykulacja tworzyw sztucznych w Polsce i w Europie, <http://ebookbrowse.com/recykulacja-tworzyw-sztucznych-w-polsce-pdf-d62789206>, z dnia 03.07.2013.
7. Borkowski K. Odpady tworzyw sztucznych... - odzysk energii. *Recykling* 10(142), 18-20, 2012.
8. Czop M., Kajda-Szcześniak M. Ocena podstawowych właściwości paliwowych odpadów remontowo-budowlanych z sektora komunalnego. *Rocznik Ochrony Środowiska*, Tom. 15 nr 2, s. 1426-1439, 2013.
9. Miskolczy N., Bartha L., Deák G., Jóver B. Thermal degradation of municipal plastic waste for production of fuel-like hydrocarbons. *Polymer Degradation and Stability*, 86, 357-366, 2004.
10. Łuksa A., Olędzka E., Sobczak M. Pyrolysis as one of ways of plastics waste recycling. *Elastomery*, 9(5), pp 30-36, 2005.



11. Tworzywa sztuczne – fakty 2011. Analiza produkcji, zapotrzebowania oraz odzysku tworzyw sztucznych w Europie w roku 2010, odczyt z [http://www.plasticseurope.org/documents/document/20111114105347\\_fakty2011\\_final.pdf](http://www.plasticseurope.org/documents/document/20111114105347_fakty2011_final.pdf), z dnia 30.08. 2012.
12. Poskrobko S., Łach J., Król D.: Badanie podstawowych właściwości paliwowych wybranych odpadów przemysłowych i paliw formowanych z odpadów, *Energetyka*, Nr 9, 631-638, 2009.
13. Bieniek J., Domaradzka M., Przybysz K. Wykorzystanie paliw alternatywnych na bazie wyselekcjonowanych frakcji odpadów komunalnych i przemysłowych w cementowni Góraźdże. *Acta Agrophysica*, 17(2), 277-288, 2011.
14. PN-Z-15008-02:1993. Odpady komunalne stałe. Badania właściwości paliwowych. Oznaczanie wilgotności całkowitej.
15. PN-Z-15008-03:1993. Odpady komunalne stałe. Badania właściwości paliwowych. Oznaczanie zawartości części palnych i niepalnych.
16. PN-G-04516:1998. Paliwa stałe. Oznaczanie zawartości części lotnych metodą wagową.
17. PN-ISO 1928:2002 Paliwa stałe. Oznaczanie ciepła spalania metodą spalania w bombie kalorymetrycznej i obliczanie wartości opałowej.
18. Kotlicki T. Oznaczanie ciepła spalania węgla za pomocą kalorymetru. Instrukcja do ćwiczenia laboratoryjnego. 2007. [http://www.i15.p.lodz.pl/strony/elektrownie/spalanie\\_wegla.pdf](http://www.i15.p.lodz.pl/strony/elektrownie/spalanie_wegla.pdf), z dnia 05.07.2013.
19. ISO 609:1996. Solid mineral fuels. Determination of carbon and hydrogen - High temperature combustion method.
20. PN-ISO 334:1997. Paliwa stałe. Oznaczanie siarki całkowitej - Metoda Eschki.
21. PN-G-04523:1992. Paliwa stałe. Oznaczanie zawartości azotu metodą Kjeldahla.
22. PN-ISO 587:2000. Paliwa stałe. Oznaczanie zawartości chloru z zastosowaniem mieszaniny Eschki.
23. PN-Z-15008-06:1993. Odpady komunalne stałe. Badania właściwości paliwowych. Oznaczanie zawartości składników agresywnych.
24. Kruczek H. Standaryzacja paliw alternatywnych do spalania i współspalania w kotłach energetycznych – potencjał naukowo badawczy i wdrożeniowy. Raport. SIEĆ NAUKOWO - GOSPODARCZA „ENERGIA”. Wrocław 2007. <http://www.energia.dcz.t.wroc.pl/files/Standaryzacja%20paliw%20alternatywnych%20do%20spalania%20i%20wsp%20C3%B3C5%82spalania%20w%20kot%20C5%82ach%20energetycznych.pdf>
25. Adsorpcja metali przez mikroorganizmy. PDF, <http://ebookbrowse.com/adsorpcja-metali-przez-mikroorganizmy-pdf-d62770671>, z dnia 10.06.2013.

