



## Simulation of changes in energy parameters of the municipal waste due to the creation of a waste management system under the new legal structure

Gabriela JAGLARZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, Tel. 500 093 394

### Abstract

Nowadays, municipal waste is becoming a very competitive source of heat and electricity. Plenty of installations throughout Europe have exploited calorific value of waste for many years, whereas in Poland there are some advanced investment processes aimed at building the waste treatment plants. There are also implementations of many new legal regulations, which supposed to be profitable for waste management. Unfortunately it could be very useless for planned installations. The article presents the analysis of impact of recycling and waste sorting on waste calorific value.

**Keywords:** waste management, waste incineration, recycling, lower heating value

### Streszczenie

Symulacja zmian parametrów energetycznych odpadów komunalnych w wyniku budowy systemu gospodarki odpadami w nowych ramach prawnych

Odpady komunalne zyskują coraz szersze zastosowanie jako paliwo do produkcji energii cieplnej i elektrycznej. Ich właściwości energetyczne są od wielu lat wykorzystywane w Europie, a w Polsce trwają procesy inwestycyjne mające na celu budowę zakładów termicznego przekształcania odpadów. Należy jednak zauważyć, że ostatnio wprowadzane zmiany prawne, które w założeniu mają korzystnie wpływać na gospodarkę odpadami, mogą pogorszyć efekt planowanych inwestycji. W artykule przedstawiono analizę wpływu segregacji odpadów i osiągnięcia określonych poziomów odzysku i recyklingu na właściwości paliwowe odpadów na podstawie przeprowadzonych badań empirycznych.

**Słowa kluczowe:** gospodarka odpadami, termiczne przekształcanie odpadów, recykling, wartość opałowa

### 1. Wstęp

W Polsce w najbliższych latach planowana jest budowa kilku spalarni odpadów komunalnych. Obecnie trwają prace przedinwestycyjne dla planowanych instalacji. Biorąc pod uwagę skomplikowane procedury prawne i protesty lokalnych społeczności oraz okres budowy i rozruchu instalacji szacuje się, że w Krakowie, Bydgoszczy czy Szczecinie spalarnie mogą zostać oddane do użytku w latach 2015 - 2018. Jednym z kryteriów branych pod uwagę przy projektowaniu instalacji termicznego przekształcania komunalnych odpadów zmieszanych są ich właściwości paliwowe.

Przy projektowaniu spalarni, które zostaną wybudowane w najbliższych 5-ciu latach należy wziąć pod uwagę planowane w bliskiej perspektywie czasu zmiany w polskim prawie. W przypadku spalarni odpadów duże znaczenie może mieć Ustawa o utrzymaniu czystości i porządku w gminach z dnia 1 lipca 2011 (Dz. U. 2011. 152. 897). Od roku 2020 50% masy tworzyw sztucznych, papieru, metali i szkła w stosunku do masy tych substancji wytworzonych w roku 1995, musi zostać odseparowana od strumienia odpadów i zagospodarowana w procesach odzysku i recyklingu. Wyłączenie ze strumienia odpadów kierowanych do spalania tworzyw sztucznych i papieru może znacząco wpłynąć na obniżenie ich wartości opałowej. Średnia wartość opałowa wynosi 9,490 MJ/kg i 24,37 MJ/kg odpowiednio dla papieru i tworzyw sztucznych[1]. W konsekwencji może zmniejszyć się efektywność energetyczna procesu, a tym samym obniży się opłacalność planowanych inwestycji.

Celem przeprowadzonej symulacji było wykazanie zmian wartości energetycznych odpadów komunalnych w Polsce w wyniku wprowadzenia zmian w funkcjonowaniu systemu gospodarki odpadami komunalnymi po wprowadzeniu nowelizacji prawa polskiego.

Mając na uwadze prawdopodobne ograniczenie udziału masowego tworzyw sztucznych i papieru w strumieniu odpadów w perspektywie roku 2020 przeprowadzono symulacje wpływu redukcji ilości tych odpadów na wartość energetyczną odpadów (jako paliwa), a w ostateczności na ilość energii jaką można będzie uzyskać w procesie spalania.

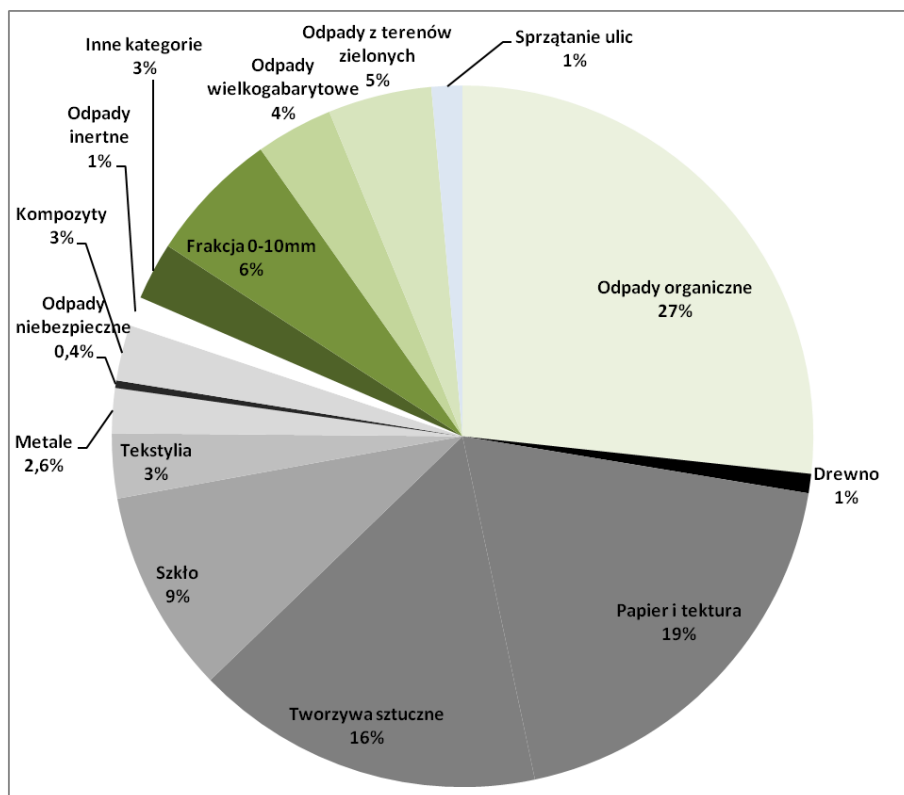
## 2. Odpady w Gminie Miejskiej Kraków

Obecnie system gospodarki odpadami komunalnymi w Krakowie składa się z segregacji u źródła, sortowni odpadów, kompostowni odpadów zielonych i składowiska odpadów komunalnych o poniżej przedstawionych parametrach pracy:

- składowisko Barycz o pojemności około 2 mln m<sup>3</sup>; (3 etap)
- 2 kompostownie przetwarzające odpady zielone w ilości 6 000 Mg/rok, każda
- sortownia surowców wtórnych, o odzysku docelowym surowców na poziomie ok. 20 000 Mg/rok; na jedną zmianę.

W związku z nowymi regulacjami prawnymi ograniczającymi możliwość składowania odpadów, obecnie funkcjonujący system gospodarki odpadami stał się niewystarczający. Władze Miasta podjęły decyzję o jego rozbudowie o instalację termicznego przekształcania. Jej zadaniem będzie spalanie frakcji odpadów pozostałych po procesach przetworzenia, odzysku i recyklingu.

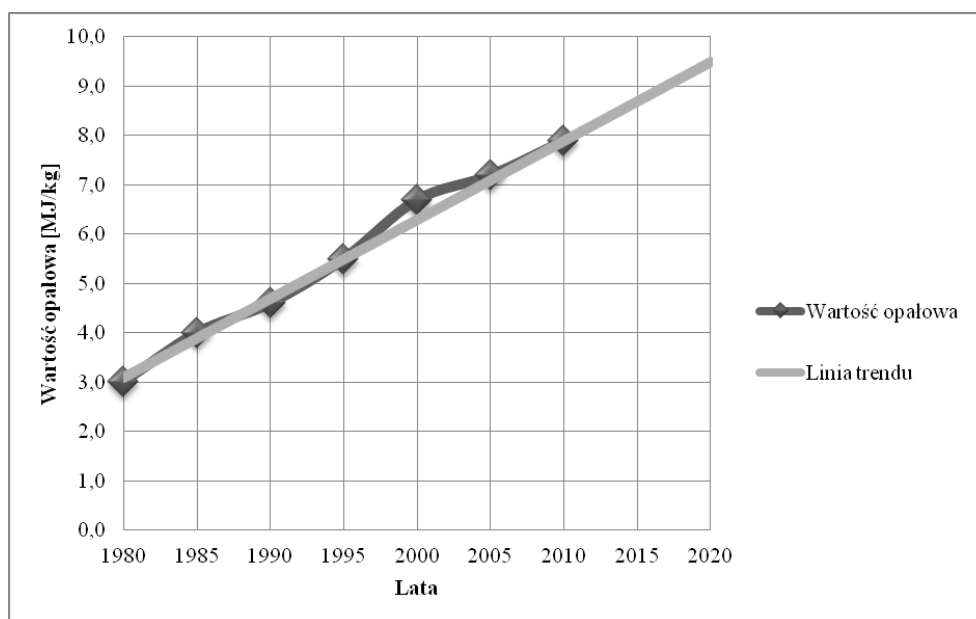
W roku 2008 w Gminie Miejskiej Kraków wytworzono 320 000 Mg odpadów komunalnych[2]. Największy udział w ogólnym strumieniu odpadów mają papier i tworzywa sztuczne odpowiednio 19 % i 16 % (rys. 2.1), dlatego też ograniczenie udziału tych substancji może znacząco wpłynąć na wartości opałową odpadów.



Rys. 2.1 Morfologia odpadów w Krakowie [2]

Szacuje się, że aktualna wartość opałowa odpadów z terenu Krakowa wynosi 8,5-9 MJ/kg, a w perspektywie kolejnych lat będzie wzrastać (rys.2.2). Spodziewany wzrost związany jest ze stale zwiększającą się ilością opakowań jednorazowych, a także ze wzrastającym konsumpcjonizmem i wygodą społeczeństwa. Spalarnia projektowana jest dla aktualnej, szacunkowej wartości opałowej odpadów i na tej podstawie obliczana jest jej efektywność energetyczna.

Na rys. 2.2 przedstawiono szacunkową analizę zmian wartości opałowej dla odpadów komunalnych dla Miasta Krakowa na lata 1980 – 2008 [2] i prognozę do roku 2020 r. Uprawnionym jest stwierdzenie, że podobny proces zmian wartości opałowej dotyczył wszystkich większych miast w Polsce i aktualnie wszędzie wartość opałowa ma zbliżoną wielkość. W związku z tym tam, gdzie planowana jest budowa instalacji do termicznego przekształcania odpadów komunalnych prowadzone są prace projektowe właśnie dla zadanych warunków około 8,3 MJ/kg. Zatem każda zmiana związana z obniżeniem wartości opałowej może negatywnie wpłynąć na ewentualną pracę instalacji.

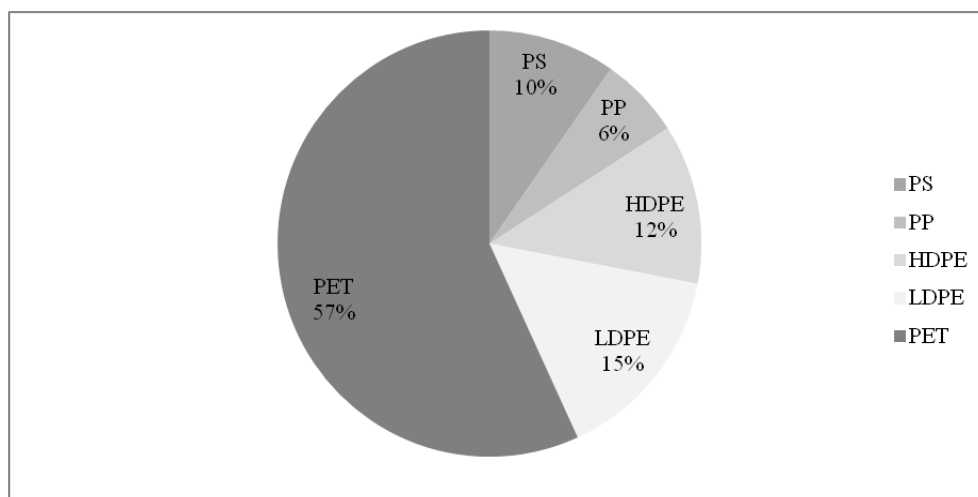


Rys. 2.2 Wartość opałowa odpadów komunalnych Gminy Miejskiej Kraków w latach 1980 - 2008, prognoza do roku 2020.

### 3. Część badawcza

W celu przeprowadzenia dokładniejszej symulacji zmian wartości opałowej odpadów określono rodzaj i ilość odpadów z tworzyw sztucznych ze względu na ich wysokie zróżnicowanie. Ze strumienia odpadów z tworzyw sztucznych wydzielono – polistyren (PS), polipropylen (PP), polietylen o wysokiej gęstości (HDPE), polietylen o niskiej gęstości (LDPE), poli(tereftalen) etylenu (PET).

Do analizy wykorzystano roczne badania przeprowadzone przez Koło Naukowe Gospodarki Odpadami na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Krakowskiej w latach 2009/2010 i 2011/2012. Badania polegały na regularnym (2 razy w miesiącu) segregowaniu próby około 300 kg odpadów z miasta Kraków zbieranych selektywnie do tak zwanych żółtych worków. W workach tych mieszkańcy gromadzą segregowane frakcje użyteczne, czyste. Badania zostały przeprowadzone dla zabudowy jednorodzinnej. Badania takie obarczone są pewnym błędem, jednakże umożliwiają przybliżone określenie zawartości tworzyw sztucznych w masie odpadów (rys. 3.1).



Rys. 3.1. Udziały poszczególnych frakcji tworzyw sztucznych dla Gminy Kraków.

### 3.1. Metodyka badań.

Na podstawie danych z Instytut Ekologii Terenów Uprzemysłowionych [2], oszacowano przybliżony skład odpadów, które po wstępnej segregacji w gospodarstwach domowych trafiają na składowisko lub w przyszłości do spalarni odpadów komunalnych.

Tabela. 3.1. Skład oraz właściwości odpadów komunalnych.

Frakcja	Udział [%]	Masa [Mg] [2]	Wilgotność [%] [1]	Części palne [%] [1]	Popiół [%] [1]	Frakcje
Organiczne	37,4	85 316	71,59	21,84	6,57	Frakcja Organiczna
HDPE	2,3	5289	0	97,61	2,39	Frakcja nadsitowa >100mm
LDPE	2,9	6609	0	97,61	2,39	
PP	1,2	2700	0	97,08	2,92	
PS	1,9	4231	0	98,62	1,38	
PET	10,9	24790	0	96,64	3,36	
Papier i tektura	22,8	51835	25	60	15	
Drewno	1,3	2 851	20	79,2	0,8	
Szkło	8,8	20 007	0	0	100	
Metale	1,5	3 316	0	0	100	
Tekstylna	2,1	5050	0	88,93	11,07	
Fr. podsitowa	6,9	15615	6,47	76,93	16,60	Frakcja podsitowa <10mm

Udziały procentowe trzech najważniejszych frakcji odpadów obliczono na podstawie danych przedstawionych w tab. 3.1 i na rys. 3.1. Na frakcję nadsitową składają się odpady o uziarnieniu > 100 mm, czyli: tworzywa sztuczne, papier, drewno, szkło, metal, tekstylia. Następnie wydzielono frakcję organiczną, która składa się głównie z resztek żywności i stanowi 37,4 % całego strumienia odpadów. Najmniej znaczącą ze względu na właściwości i ilość jest frakcja podsitowa (6,9 %), o uziarnieniu poniżej 10 mm, która stanowi w dużej mierze pokruszone szkło, piasek, żwir, elementy organiczne, popiół. Zawartość wilgoci, części palnych i popiołów dla frakcji nadsitowej policzono jako średnią ważoną z wartości przedstawionych w tab. 3.1, a dla frakcji organicznej i podsitowej wartości pochodzą z badań laboratoryjnych.

Tabela. 3.2. Zestawienie wilgotności, części palnych i niepalnych dla poszczególnych frakcji.

Frakcja	Udział [%]	Wilgotność [%]	Cz. palne [%]	Popiół [%]
Nadsitowa > 100mm	55,7	10,70	63,24	26,06
Podsitowa < 10mm	6,9	6,47	76,93	16,60
Organiczna > 10mm	37,4	71,59	21,84	6,57
Wartość średnia dla całego odpadu	100	33,18	48,70	18,12

W badanych próbkach odpadów, szacując na podstawie zawartości frakcji odpadów, najwyższą wartość opałową mają odpady z frakcji nadsitowej. Ponad 55 % tej frakcji stanowią tworzywa sztuczne, papier i drewno o wartościach opałowych odpowiednio 24,37 MJ/kg, 9,490 MJ/kg i 14,46 MJ/kg[1]. Odpady z tej frakcji gwarantują autotermiczność spalania ze względu na bardzo niską wilgotność i wysoką wartość opałową.

W celu wykonania dalszych obliczeń służących wyznaczeniu wartości opałowej odpadów konieczne było określenie zawartości węgla, wodoru i tlenu w poszczególnych frakcjach odpadów (tab.3.3). Dla większości z tych frakcji wzory chemiczne są znane, jednak dla tekstyliów przyjęto upraszczające założenie. Ze względu na dużą niejednorodność tekstyliów i szacunkowy charakter obliczeń zakłada się, iż są one jednorodnymi włóknami poliestrowymi. W obliczeniach nie uwzględniono frakcji podsitowej, ze względu na trudne do oszacowania udziały poszczególnych jej składników.

Tabela. 3.3. Zawartość pierwiastków w poszczególnych frakcjach. [3]

Próbka	Wzór chemiczny	C	H	O
Organiczne	$(C_6H_{10}O_5)_n$	$\frac{72}{162}$	$\frac{10}{162}$	$\frac{80}{162}$
HDPE	$(C_2H_4)_n$	$\frac{24}{28}$	$\frac{4}{28}$	
LDPE	$(C_2H_4)_n$	$\frac{24}{28}$	$\frac{4}{28}$	
PP	$(C_3H_6)_n$	$\frac{36}{42}$	$\frac{6}{42}$	
PS	$(C_8H_8)_n$	$\frac{96}{104}$	$\frac{8}{104}$	
PET	$(C_{10}H_8O_4)_n$	$\frac{120}{192}$	$\frac{8}{192}$	$\frac{64}{192}$
Papier	$(C_6H_{10}O_5)_n$	$\frac{72}{162}$	$\frac{10}{162}$	$\frac{80}{162}$
Drewno	$(C_6H_{10}O_5)_n$	$\frac{72}{162}$	$\frac{10}{162}$	$\frac{80}{162}$
Tekstyli	$(C_2O_3R)_n$	$\frac{24}{72}$		$\frac{48}{72}$
Podsitowa	-	-	-	-

### 3.2. Analiza właściwości energetycznych odpadów w mieście Kraków (stan rok 2010).

Wartość opałową ( $W_d$ ) i ciepło spalania ( $W_g$ ) odpadów oszacowano na podstawie wzoru Dulonga:

$$W_d = 34080 * c^d + 121420 \left( h^d - \frac{o^{if}}{8} \right) \quad (3.1)$$

gdzie:  $c^d$ ,  $o^d$ ,  $h^d$  – zawartość poszczególnych pierwiastków przy wilgotności 0%

Zawartość pierwiastków oszacowano na podstawie zależności:

$$x^d = \sum c_i \cdot r_i \quad (3.2)$$

gdzie

$x^d$  – zawartość węgla, tlenu i wodoru w zmieszonym odpadzie,

$c_i$  – zawartość węgla, tlenu i wodoru w poszczególnych frakcjach,

$r_i$  – udziały poszczególnych frakcji

Zawartość pierwiastków w suchej masie:

$$C^d = 0,4 \cdot \frac{72}{162} + 0,02 \cdot \frac{24}{28} + 0,03 \cdot \frac{24}{28} + 0,01 \cdot \frac{36}{42} + 0,02 \cdot \frac{96}{104} + 0,12 \cdot \frac{120}{192} + 0,24 \cdot \frac{72}{162} + 0,03 \cdot \frac{72}{162} + 0,02 \cdot \frac{24}{72} + 0,08 \cdot 0 + 0,03 \cdot 0 = 0,46 = 46 \% \quad (3.3)$$

Tabela 3.4. Udział poszczególnych pierwiastków w stanie suchym i rzeczywistym – odpady niesegregowane dla Gminy Kraków.

Pierwiastek	Udział w stanie suchym	Udział w stanie roboczym
C	0,49	0,3
H	0,06	0,04
O	0,45	0,28

$$W_g = 34080 \cdot 0,3 + 121420 \left( 0,04 - \frac{0,28}{g} \right) = 10\ 831 \text{ [kJ/kg]} \quad (3.4)$$

Odpady o wilgotności obliczeniowej 33,18 %:

$$W_d = W_g - r_n \cdot (8,94 \cdot h^r + w) \quad (3.5)$$

$$W_d = 10\ 831 - 2443 \cdot (8,94 \cdot 0,04 + 0,3318) = 9\ 147 \text{ [kJ/kg]} \quad (3.6)$$

$$Q = M_{\text{odp}} \cdot \eta \cdot n \cdot W_d \quad (3.7)$$

$$Q = 227\ 000 \cdot 0,75 \cdot 9\ 147 \cdot 0,85 = 1323 \text{ [TJ/rok]} \quad (3.8)$$

Gdzie:

$M_{\text{odp}}$  – strumień masy odpadów

$\eta$  - sprawność wytwarzania energii w kogeneracji ( $\eta = 0,85$ )

$n$  – udział produkcji energii cieplnej w kogeneracji ( $n=0,75$ )

$W_d$  – obliczeniowa wartość opałowa odpadów

#### 4. Symulacja wartości opałowej odpadów przy uwzględnieniu regulacji prawnych

W chwili obecnej nie istnieje jednoznaczna interpretacja dotycząca wydzielenia 50% odpadów w ramach selektywnej segregacji. Możliwe scenariusze zakładają, że należy wyeliminować ze strumienia odpadów 50% każdego rodzaju odpadów lub wyeliminować sumarycznie 50% odpadów. Rozpatrzono dwa przypadki.

- w przypadku (a) wysegregowane będzie dokładnie po 50 % każdego rodzaju odpadu (szkła, metalu, tworzyw sztucznych i papieru),
- w przypadku (b) wysegregowane będzie 100 % szkła i metalu ze względu na brak właściwości paliwowych tych frakcji, brakująca masa odpadów do wysegregowania uzupełniona będzie papierem i tworzywami sztucznymi.

Zostały przeprowadzone 2 wersje obliczeniowe ukazujące końcowy efekt energetyczny dla obydwu wariantów.

a. Segregacja po 50 % każdej frakcji

Tabela 4.1. Zestawienie wilgoci, części palnych i części niepalnych odpadów wysegregowanych dla Gminy Kraków.

Fracja	Udział [%]	Wilgoć [%]	Cz. palne [%]	Popiół [%]
Nadsitowa > 100mm	38,6	10,67	63,25	26,08
Podsitowa < 10mm	9,5	6,47	76,93	16,60
Organiczna > 10mm	51,9	71,59	21,84	6,57
Wartość średnia dla całego odpadu	100	41,91	43,02	15,07

Tabela 4.2. Udział poszczególnych pierwiastków w stanie suchym i rzeczywistym.

Pierwiastek	Udział w stanie suchym	Udział w stanie roboczym
C	0,41	0,23
H	0,05	0,03
O	0,37	0,21

Odpady o wilgotności obliczeniowej 41,91%:

$$W_d = 6614 \text{ [kJ/kg]} \quad (4.1)$$

Ilość energii wyprodukowanej przy wartości opałowej 6 614 kJ/kg i strumieniu masowym odpadów 164 270 Mg/rok:

$$Q = 692 \text{ [TJ/rok]} \quad (4.2)$$

Jednakże przy wartości opałowej 6 614 kJ/kg mogą wystąpić trudności z przeprowadzaniem procesu autotermicznego spalania odpadów, gdyż za wartość graniczną uznaje się 6 000 kJ/kg. W związku z tym proces może wymagać dodatkowego paliwa na przykład w postaci RDF (Refuse Derived Fuels) lub paliwa konwencjonalnego, co wiązałoby się z większymi kosztami eksploatacyjnymi.

b. Segregacja w sumie 50 % z sumy wybranych frakcji

Tabela 4.3. Zestawienie wilgoci, części palnych i części niepalnych odpadów wysegregowanych dla Gminy Kraków.

Fracja	Udział [%]	Wilgoć [%]	Cz. Palne [%]	Popiół [%]
Nadsitowa > 100mm	38,6	10,67	81,16	8,17
Podsitowa < 10mm	9,5	6,47	76,93	16,60
Organiczna > 10mm	51,9	71,59	21,84	6,57
Wartość średnia dla całego odpadu	100	41,89	49,95	8,16

Tabela 4.4. Udział pierwiastków w stanie suchym i rzeczywistym.

Pierwiastek	Udział w stanie suchym	Udział w stanie roboczym
C	0,47	0,26
H	0,06	0,03
O	0,38	0,21

Odpady o wilgotności obliczeniowej 41,89%:

$$W_d = 7227 \text{ [kJ/kg]} \quad (4.3)$$

Ilość energii wyprodukowanej przy wartości opałowej 7 227 kJ/kg i strumieniu masowym odpadów 164 270 Mg/rok:

$$Q = 756 \text{ [TJ/rok]} \quad (4.4)$$

#### 4.1. Zestawienie wyników:

Tabela 4.5. Zestawienie wszystkich obliczeń.

	2010	2020 (po 50%)	2020 (suma 50%)
Ilość odpadów do przetworzenia [Mg/rok]	227 000	164 270	164 270
Szkło [Mg/rok]	20 007	10 004	0
Metal [Mg/rok]	3316	1680	0
Tw. Sztuczne [Mg/rok]	43619	21831	33 471
Papier [Mg/rok]	51835	25917	25917
Wilgotność [%]	35,43	41,91	41,89
Cz. Niepalne [%]	15,80	15,07	8,16
Cz. Palne [%]	48,77	43,02	49,95
<b>Wartość opałowa [MJ/kg]</b>	<b>9,147</b>	<b>6,614</b>	<b>7,227</b>
<b>Energia cieplna [TJ/rok] uzyskana w wyniku spalania odpadów</b>	<b>1323</b>	<b>692</b>	<b>756</b>

#### 5. Podsumowanie

- Nowelizacja przepisów prawa polskiego w zakresie gospodarowania odpadami stanowi podstawę do przebudowy systemu gospodarki odpadami poprzez regionalizację oraz wzrost ilości przetwarzanych frakcji użytkowych z odpadów; wprowadzone przepisy prawa będą miały wpływ na charakterystyki odpadów i zmianę ich właściwości,
- Wraz z wysegregowaniem frakcji palnych odpadów takich jak papier i tworzywa sztuczne nastąpi znaczne obniżenie wartości opałowej odpadów z 9,147 MJ/kg aż do 6,614 MJ/kg,
- Segregacja odpadów spowoduje utratę energii możliwej do uzyskania ze spalania, co może wpłynąć na cenę przyjęcia odpadów do wszystkich instalacji w systemie gospodarki odpadami, co z kolei może wpłynąć na zmniejszenie opłacalności planowanych przedsięwzięć związanych z budową wielu zakładów termicznego unieszkodliwiania odpadów komunalnych w Polsce,
- W aspekcie energetycznego wykorzystania odpadów komunalnych, korzystniejsza jest zdecydowanie interpretacja ustawy mówiąca o wysegregowaniu sumy 50 % odpadów z wyżej wymienionych 4 frakcji, niż wysegregowanie po 50 % z każdej z nich osobno; natomiast w aspekcie odzysku i recyklingu frakcji użytkowych, należałoby dla każdego regionu wykonać szczegółowy rachunek ekologiczno – ekonomiczny wskazujący na najkorzystniejsze rozwiązanie,
- W przypadku Krakowa wysegregowanie 50% frakcji surowcowej, czyli 25% całej masy odpadów spowoduje zmniejszenie ilości strumienia odpadów przeznaczonych do spalania, tym samym przewidywana wydajność projektowanej spalarni mogłaby wydawać się przeszacowana, należy jednak wziąć pod uwagę charakterystyki odpadów dla całej aglomeracji (uwzględniając okoliczne gminy), ponieważ spalarnia jako instalacja regionalna może objąć swym zasięgiem nie tylko Kraków,
- Możliwa będzie konieczność użycia do procesu spalania paliw formowanych lub innych paliw kopalnych. Rozwiązania takie wpływają negatywnie na koszty eksploatacyjne, a także wymagają dodatkowych nakładów energetycznych na przykład na uzyskanie (odseparowanie, rozdrobnienie) wysokoenergetycznej frakcji odpadów (Refuse Derived Fuels).



### **Literatura**

1. Janusz Wandrasz, Andrzej Wandrasz, Paliwa formowane: biopaliwa i paliwa z odpadów w procesach termicznych, Wyd. Seidel-Przywecki, Warszawa, 2006
  2. Instytut Ekologii Terenów Uprzemysłowionych Katowice, Badanie ilości i struktury odpadów komunalnych dla Miasta Krakowa – raport końcowy, 2008 Katowice, s. 22
  3. Jacek Sacharczuk, Termiczne Unieszkodliwianie Odpadów. Ćwiczenia laboratoryjne – właściwości paliwowe odpadów, s. 11, materiały niepublikowane
-

