

## WYBRANE ODPADY TWORZYW SZTUCZNYCH JAKO ŹRÓDŁA PALIW ALTERNATYWNYCH W PRZEMYŚLE METALURGICZNYM

*W artykule przedstawiono aspekty energetyczne procesu wytwarzania stali i scharakteryzowano stosowane paliwa alternatywne. Przedstawiono podział odpady tworzyw sztucznych, możliwości ich ponownego wykorzystania i zagospodarowania oraz metody wykorzystania odpadów tworzyw sztucznych w procesach metalurgicznych.*

*Słowa kluczowe: ciepło, paliwa alternatywne, odpady z tworzyw sztucznych, recykling, ochrona środowiska*

## SELECTED PLASTIC WASTE AS A SOURCE OF ALTERNATIVE FUELS IN THE METALLURGICAL INDUSTRY

*In this article the energy power of steel making process and alternative fuels were presented. The division of plastic waste, possibilities of its reused and their recycling were shown and methods for used of plastic waste in metallurgical processes were characterized.*

*Keywords: heat, alternative fuels, plastic waste, recycling, environmental protection*

### 1. WSTĘP

Problem ponownego wykorzystania materiałów odpadowych w cyklu produkcyjnym żelaza i stali jest aktualny w praktyce przemysłowej praktycznie od początków hutnictwa. Początkowo było to związane z wykorzystaniem takich metalicznych odpadów produkcyjnych i złomu, następnie żużli wielkopiecowych i stalowniczych, a obecnie także pyłów, szlamów, mułków zgorzelinowych oraz odpadów przemysłowych. Procesy recyklingu hutniczych materiałów odpadowych realizowane są zarówno w agregatach linii produkcyjnej: surówka żelaza – stal, jak i w urządzeniach stanowiących wyodrębnione technologie opracowane dla celów recyklingu i utylizacji materiałów odpadowych. Obecnie zaczyna się upowszechniać w hutnictwie model produkcyjny zakładający produkcję „zeroodpadową”.

### 2. ASPEKTY ENERGETYCZNE WYTWARZANIA STALI

Efektywne wykorzystanie surowców kopalnych i mineralnych doprowadziło w światowym przemyśle stalowym do udoskonaleń w dziedzinie przerobu surowców, metalurgii, techniki procesów przetwórczych, techniki instalacyjnej i gospodarki energetycznej. W tablicy 1 przedstawiono zużycie energii, paliw i surowców w procesach stalowniczych. Podstawowym nośnikiem energii przy produkcji żelaza i stali jest węgiel.

Obecnie na kopalne nośniki energii – ropa naftowa, węgiel, gaz ziemny przypada 90% ogólnego zużycia. Światowa Rada Energii [2] szacuje, że do 2020 roku nastąpi kolejne podwojenie zapotrzebowania na energią.

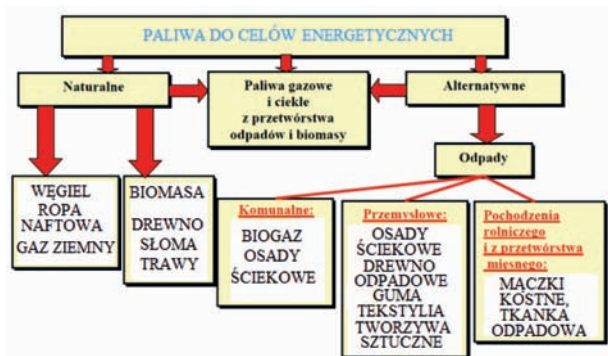
**Tablica 1. Zużycie energii, paliw i surowców w procesach stalowniczych [1]**

**Table 1. Consumption of energy, fuels and raw materials in steel making process [1]**

Zużycie	Spiekalnia	Wielkie piece	Konwertory
Paliwa stałe, kg/Mg produktu	55÷63	520÷580	0,7
Paliwa gazowe, tys. m <sup>3</sup> /Mg produktu	0,007÷0,009	0,66÷0,78	0,01÷0,02
Tlen, m <sup>3</sup> /Mg produktu	–	21,5	58
Energia elektryczna, kWh/Mg produktu	40÷50	42,2	44,4
Energia cieplna – ogółem, MJ/Mg produktu	1592÷1650	14405÷17545	385,4÷575,4
Wsad żelazonośny, kg/Mg produktu	1250÷1550	1700	1130
Tworzywa z recyklingu (zgorzeliina, pyły, szlamy, żużel), kg/Mg produktu	90	–	–
Topniki, kg/Mg produktu	150÷280	0,7	179

Na rysunku 1 przedstawiono paliwa wykorzystywane do celów energetycznych.

Należy przewidywać, że węgiel pozostanie podstawowym środkiem redukcyjnym i nośnikiem energetycznym w produkcji stali [1]. Źródłem ciepła w procesach



Rys. 1. Paliwa wykorzystywane do celów energetycznych [3]

Fig. 1. Fuels used for power purposes [3]

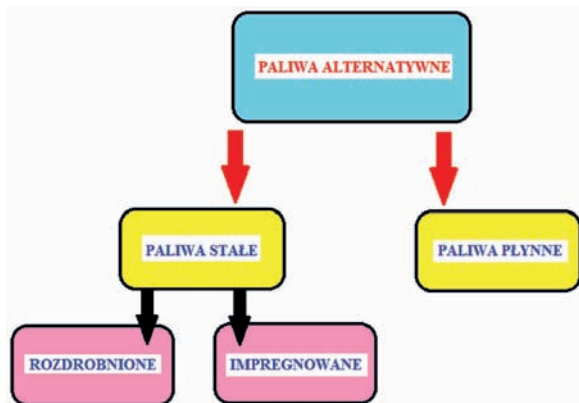
stalowniczych mogą być również specjalnie przygotowane odpady wprowadzane do agregatów metalurgicznych wraz z paliwem naturalnym bądź samodzielnie zmniejszając zużycie podstawowych nośników energii. Stopień wykorzystania energii odpadowej (tj. stosunek energii odzyskanej do zużycia całkowitego) w hutnictwie światowym w ostatnich latach zdecydowanie wzrósł i w większości uprzemysłowionych krajów wynosi od 28 do 34%. Największym wykorzystaniem energii odpadowej w obrębie samego hutnictwa może poszczycić się Japonia, a z krajów europejskich – Austria.

Obecna gospodarka energetyczna i ciepła jest możliwa dzięki wieloletnim działaniom i badaniom mającym na celu odzysk, oszczędność nośników energii i optymalizację zintegrowanej gospodarki energetycznej.

### 3. PALIWA ALTERNATYWNE JAKO ŹRÓDŁA CIEPŁA W PRZEMYSŁE STALOWYM

#### Odpady jako stałe paliwa alternatywne to:

„Odpady palne rozdrobnione o jednorodnym stopniu wymieszania, powstałe w wyniku zmieszania odpadów innych niż niebezpieczne, z udziałem lub bez udziału paliwa stałego, ciekłego lub biomasy, które w wyniku przekształcenia termicznego nie powodują przekroczenia poziomów emisji substancji zanieczyszczających, określonych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 4 sierpnia 2003 r. w sprawie standardów emisyjnych z instalacji (Dz. U. Nr 163, poz. 1584) odnoszących się do procesu współspalania odpadów” [3].



Rys. 2. Podział paliw alternatywnych [3]

Fig. 2. Division of alternative fuels [3]

Paliwami alternatywnymi (wtórnymi, zastępczymi) mogą być odpady stałe i ciekłe, komunalne i przemysłowe stosowane w zakładach przemysłowych i energetycznych jako zamiennik paliw konwencjonalnych. Na rysunku 2 przedstawiono uproszczony podział paliw alternatywnych. Według definicji paliwo alternatywne jest to paliwo uzyskane w procesie odzysku odpadów posiadających wartość opałową. Stosowane jest w przemyśle, jako zamiennik węgla kamiennego. W tabelicy 2 przedstawiono wartości opałowe najczęściej spotykanych paliw alternatywnych.

Tablica 2. Wartości opałowe odpadów stosowanych jako paliwa alternatywne [4]

Table 2. Calorific values of alternative fuels [4]

Paliwo alternatywne	Wartość opałowa [MJ/kg]
zużyte opony	29,2
tworzywa sztuczne	40–46
makulatura	ok. 11
zużyte drewno	ok. 18
zużyte rozpuszczalniki	25
zużyte gumy	30
zużyte oleje	40
odpady komunalne	7,0–10,0
łupki węglowe	12–18
muły węglowe	12–18
smoły porafinacyjne	21,0

**Paliwo stałe rozdrobnione** powstaje w wyniku rozdrabniania odpadów do określonej granulacji (rys. 3). Paliwa alternatywne stałe zastępują węgiel, miał węglowy, koks. Wartość opałowa takiego paliwa może osiągać 18–23 MJ/kg.



Rys. 3. Paliwo alternatywne z tworzyw sztucznych: a) odpady przed rozdrobnieniem, b) paliwo alternatywne [12]

Fig. 3. Alternative fuel from plastic: a) waste before crumbling, b) alternative fuel [12]

**Paliwo stałe impregnowane** powstaje w wyniku mieszania odpadów płynnych z substancjami o właściwościach chłonnych. Paliwo półsuche z odpadów płyn-

nych gęstych (smary, smoły, szlamy, odpady farb i lakierów i inne) otrzymuje się w drodze impregnacji na podłożu nasiąkliwym (trociny, pył tytoniowy, tekstylia, itd.) przez mieszanie ich w specjalnych urządzeniach. Wartość opałowa 8–11 MJ/kg.

Paliwo płynne, powstaje w wyniku mieszania odpadów płynnych. Paliwa alternatywne płynne, zastępują ciężkie oleje opałowe. Powstają z odpadów olejowych i rozpuszczalnikowych przez oczyszczanie, mieszanie i uśrednianie. Są to paliwa wysokoenergetyczne a ich wartość opałowa sięga 30–36 MJ/kg. Większość odpadów mogących znaleźć zastosowanie jako paliwa alternatywne, zwłaszcza pochodzenia chemicznego oraz odpady z gumy, olejów i tworzyw sztucznych charakteryzują się dużą wartością opałową.

*Poliolefiny* i polipropylen, wytwarzane z ropy naftowej, są produktami wysokoenergetycznymi, a ich wartość energetyczna może sięgać 47 MJ/kg, jest więc równoważna lub wyższa niż większość gatunków węgla lub koksu [3].

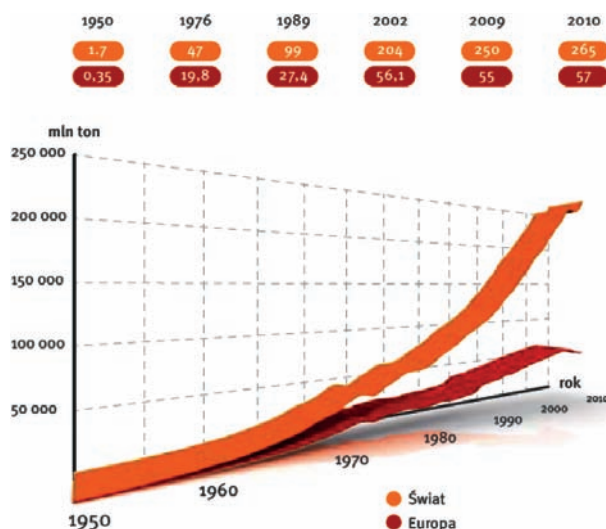
Przed wprowadzeniem do agregatu metalurgicznego odpady te powinny być odpowiednio przygotowane, (cięte, kruszone, mielone lub prasowane), zależnie od rodzaju paliwa i warunków oraz technologii obróbki spalin za agregatem.

### 3.1. TWORZYWA SZTUCZNE

W ciągu ostatnich kilkunastu lat obserwuje się stały wzrost produkcji tworzyw sztucznych (rys. 4).

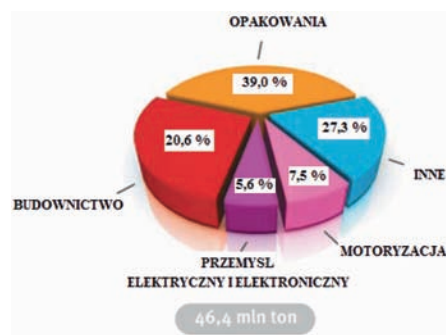
Znajdują one szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach życia: jako opakowania, w budownictwie, w rolnictwie, w przemyśle samochodowym czy elektronicznym (rys. 5). Na rys. 6 przedstawiono zapotrzebowanie na tworzywa sztuczne w Europie.

Rosnąca produkcja tworzyw sztucznych wpływa na wzrost ilości generowanych odpadów i konieczność ich zagospodarowania.



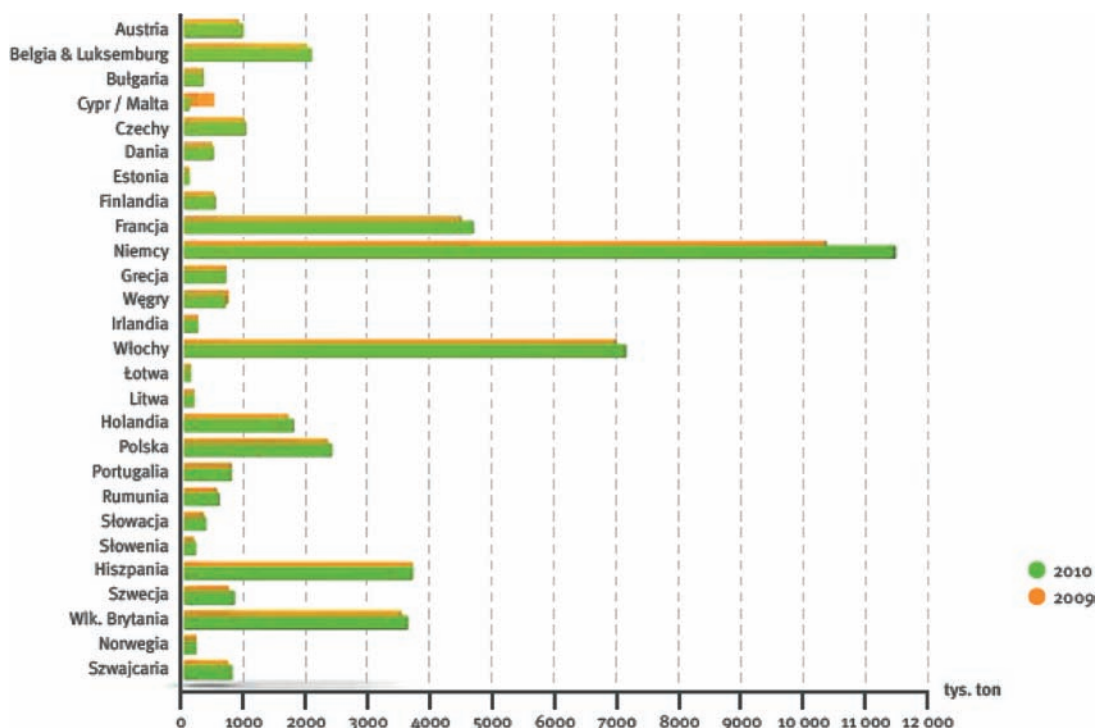
Rys. 4. Światowa produkcja tworzyw sztucznych w latach 1950-2010 [mln ton] [5]

Fig. 4. Global production of plastics in the years 1950-2010 [Mt] [5]



Rys. 5. Zużycie tworzyw sztucznych w Europie wg segmentów zastosowań w 2010 r [5]

Fig. 5. Consumption of plastics in Europe by applications in 2010 [5]



Rys. 6. Zapotrzebowanie na tworzywa sztuczne w Europie (tys. ton/rok) [5]

Fig. 6. Demand for plastics in Europe (thousand tonnes /year) [5]

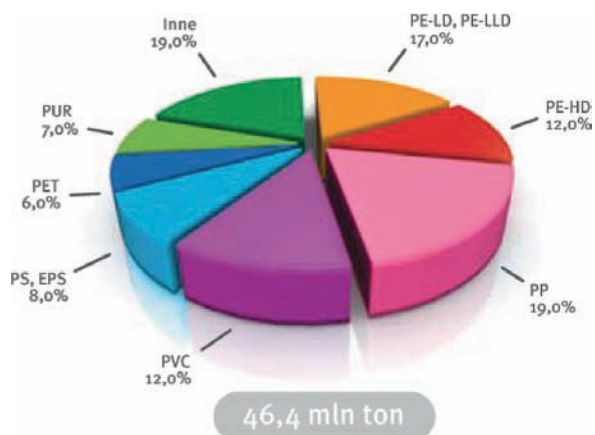
### 3.2. RECYKLING TWORZYW SZTUCZNYCH

Istotnym kryterium oceny przydatności tworzyw sztucznych do procesów recyklingu jest ich podział ze względu na budowę strukturalną.

W zależności od budowy wewnętrznej polimerów, z których wytwarzane są tworzywa sztuczne, dzielą się one na [6]:

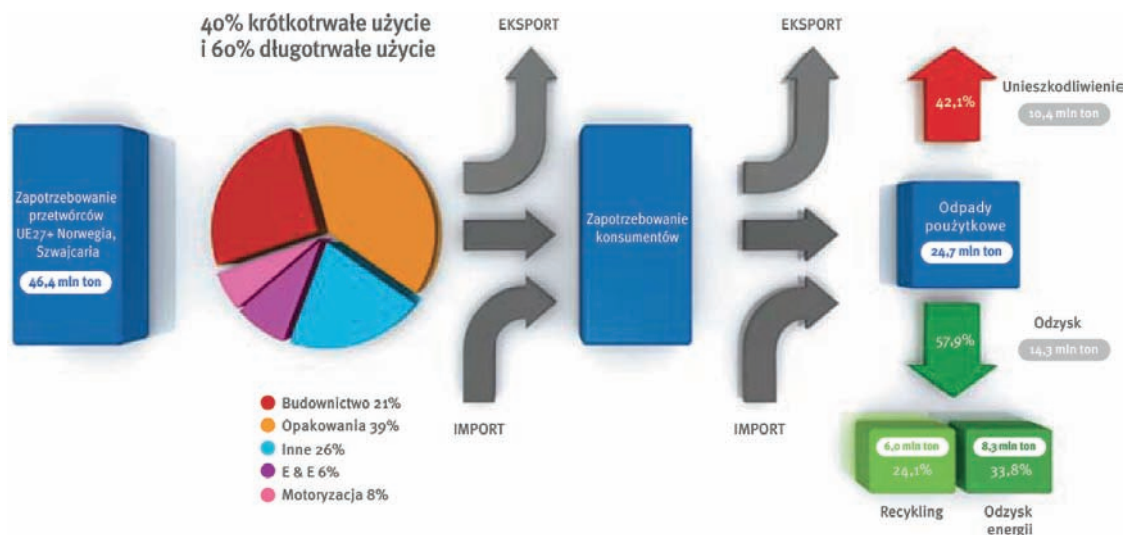
- 1) **termoplastyczne** – liniowa struktura cząsteczek. Tworzywa te po podgrzaniu miękną, przechodzą w fazę lepko-plastyczną i mogą być ponownie formowane co ułatwia ich recykling.
- 2) **termoutwardzalne** – cząsteczki o strukturze liniowej z wiązaniami poprzecznymi. Istniejące w strukturze wiązania poprzeczne uniemożliwiają przejście w stan plastyczno-ciekły. Pomimo podgrzewania są one sztywne i kruche. Dopiero w wyższych temperaturach ulegają rozkładowi termicznemu na gaz syntezowy tracąc jednocześnie strukturę polimeru.
- 3) **elastomery** – cząsteczki o strukturze liniowej z niewielką ilością wiązań poprzecznych.

Istnieją różne rodzaje tworzyw sztucznych a każdy rodzaj występując w kilku odmianach umożliwia optymalny dobór materiału do określonego zastosowania. Do „wielkiej piątki tworzyw”, które odznaczają się największym udziałem rynkowym (rys. 7) należą:



Rys. 7. Zapotrzebowanie na rodzaje tworzyw sztucznych w Europie w 2010 r. [5]

Fig. 7. Demand for types of plastics in Europe in 2010 [5]



Rys. 8. Cykl życia tworzyw sztucznych [5]

Fig. 8. Life cycle of plastics [5]

- polipropylen (PP),
- polietylen – w tym polietylen małej gęstości (PE-LD) oraz polietylen dużej gęstości (PE-HD),
- polichlorek winylu (PVC),
- polistyren (stały PS i spieniony EPS),
- politereftalan etylenu (PET)

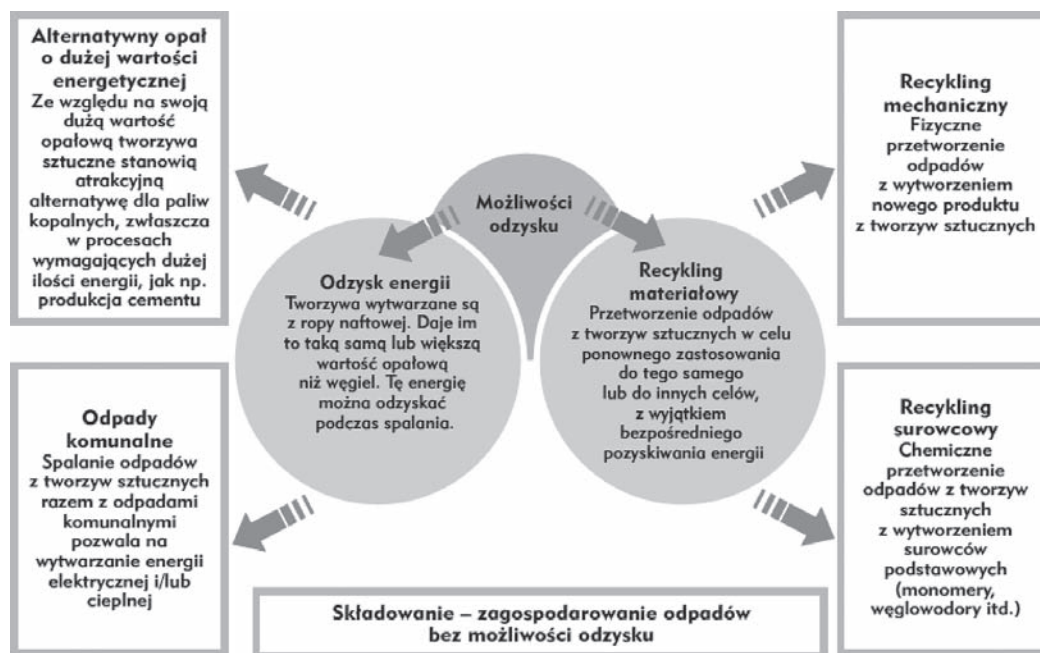
Na powyższe polimery przypada około 74% całego zapotrzebowania na tworzywa sztuczne w Europie. Na rys. 8 zilustrowano główne etapy cyklu życia tworzyw sztucznych. Rysunek 9 przedstawia możliwości wykorzystania odpadów tworzyw sztucznych.

Wszystkie tworzywa sztuczne można poddać recyklingowi mechanicznemu bądź chemicznemu. Dla niektórych odpadów korzystniejsze jest jednak pod względem ekonomicznym i środowiskowym ich wykorzystanie jako źródła energii i ciepła. Produktem odpadów tworzyw sztucznych poddanych recyklingowi materiałowemu jest recyklat służący do powtórnej produkcji np. doniczek czy mebli ogrodowych. Recykling chemiczny jest głównie stosowany dla butelki PET. Recykling materiałowy możliwy jest dopiero po wstępnym posortowaniu odpadów wg typów tworzyw oraz po usunięciu z nich zanieczyszczeń.

Z uwagi na to, iż wiele tworzyw sztucznych różni się gęstością, metoda sortowania na zasadzie pływania i opadania jest najbardziej efektywną technologią oddzielania. Najprostszym wariantem tej metody jest statyczne oddzielanie w zbiorniku (rys. 10). Do tego celu dobiera się ciecz oddzielającą, której ciężar właściwy leży między ciężarami właściwymi oddzielanych rodzajów tworzyw sztucznych. Wobec tego faza lekka będzie się wzbogacała na powierzchni, a faza ciężka będzie opadała na dno. Na rys. 11 przedstawiono zmianę wskaźników recyklingu i odzysku odpadów z tworzyw sztucznych w latach 2006–2010.

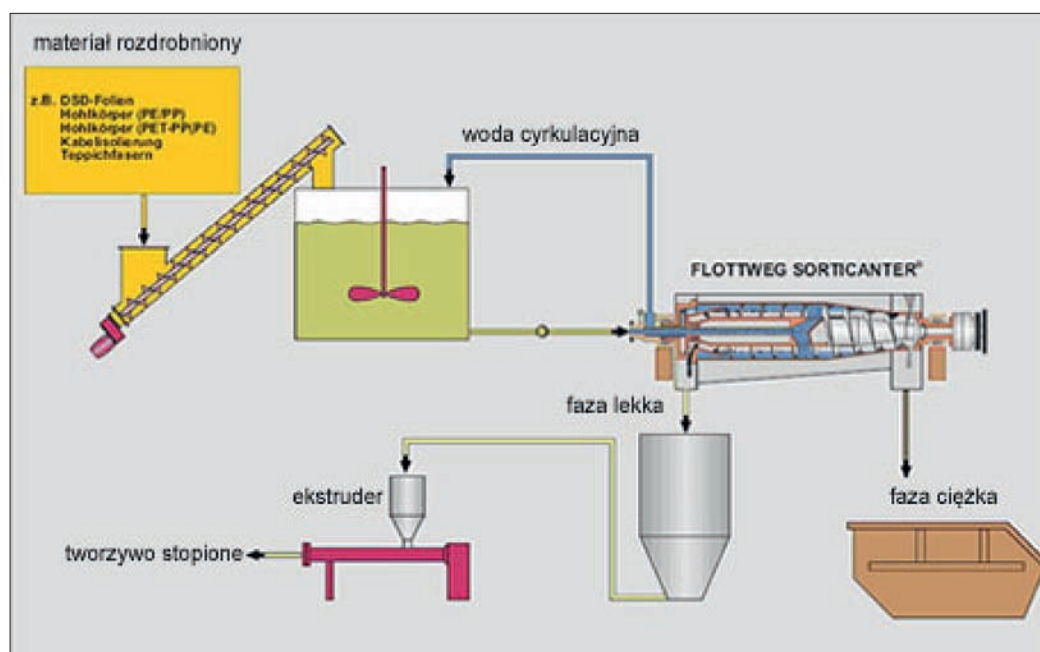
Wykorzystanie wartości odpadów tworzyw sztucznych zależy od rozwiązań danego kraju i jego infrastruktury, krajowych strategii gospodarki odpadami oraz dostępnych technologii. Najlepszy odzysk odpadów tworzyw sztucznych (rys. 12) uzyskuje się w krajach, w których obowiązują restrykcyjne przepisy dotyczące składowania odpadów.

Od kilkunastu lat w Europie obserwuje się stały postęp w zakresie odzysku odpadów tworzyw sztucznych.



Rys. 9. Postępowanie z odpadami tworzyw sztucznych [8]

Fig. 9. Handling with plastic waste [8]



Rys. 10. Sortowanie odpadów tworzyw sztucznych [9]

Fig. 10. Sorting of plastic waste [9]

Na rys. 13 przedstawiono przykładowe linie technologiczne do recyklingu odpadów tworzyw sztucznych.

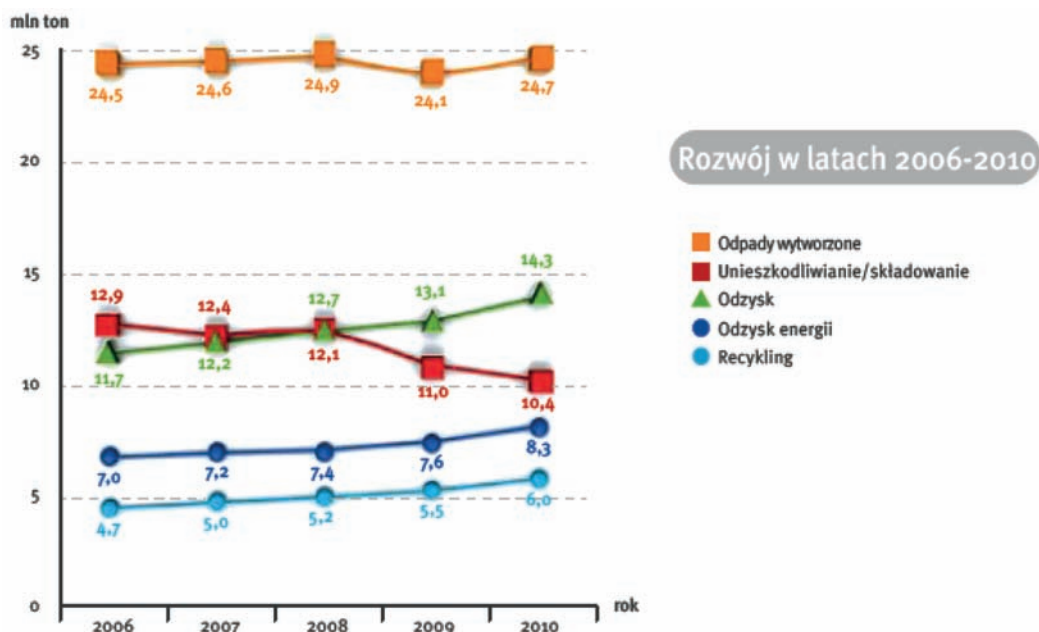
W najbliższych latach ilość tworzyw sztucznych będzie systematycznie rosła. Przemysł tworzyw sztucznych nieustannie wprowadza innowacje ale lepiej i efektywniej reagować na codzienne potrzeby społeczeństwa.

Wiąże się to jednocześnie z powstającą większą ilością odpadów tworzyw sztucznych. Recykling chroni środowisko i zasoby naturalne. Zbieranie i ponowne przetworstwo tworzyw sztucznych redukuje górę odpadów, powoduje niższe koszty usuwania odpadów i ze zużytego tworzywa sztucznego daje produkt nowy.

Odpady z tworzyw sztucznych z powodzeniem można wykorzystywać w przemyśle metalurgicznym.

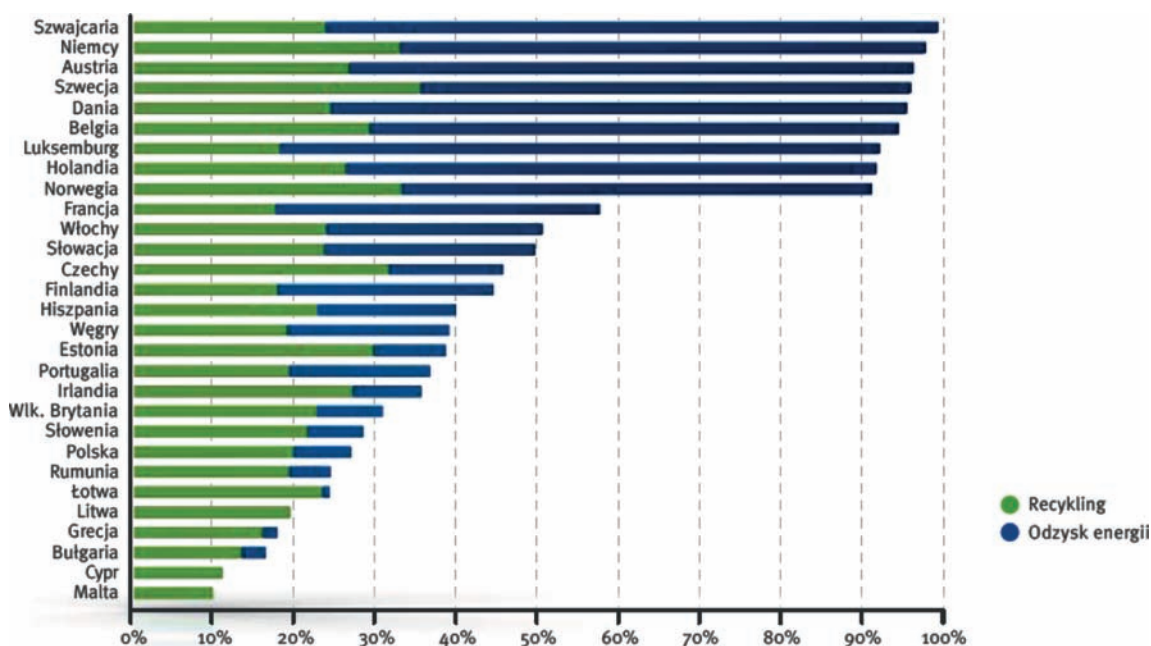
#### 4. WYKORZYSTANIE ODPADÓW TWORZYW SZTUCZNYCH W PROCESACH METALURGICZNYCH

W procesach metalurgicznych – w warunkach utleniających – tworzywa sztuczne mogą ulegać spalaniu z wydzieleniem energii cieplnej. W warunkach redukcyjnych natomiast ulegają dekompozycji na proste związki CO i H<sub>2</sub> i mogą brać udział w reakcjach che-



Rys. 11. Recykling i odzysk odpadów z tworzyw sztucznych w latach 2006–2010 [5]

Fig. 11. Recycling and recovery of plastics in the years 2006-2010 [5]



Rys. 12. Stopień odzysku odpadów tworzyw sztucznych wg krajów w 2010 r. [5]

Fig. 12. Recovery rate of plastic waste by countries in 2010 [5]

micznych (np. redukcji tlenków metali). W tabelicy 3 podano przykładowy skład chemiczny węgla, oleju i odpadów tworzyw sztucznych. Wdmuchiwanie do komory spalania tworzywa sztuczne ulegają niepełnemu spalaniu, a powstałe produkty CO i H<sub>2</sub> biorą udział w reakcji redukcji tlenków żelaza.

W tabelicy 4 przedstawiono efekty cieplne w reakcji spalania pełnego odpadów tworzyw sztucznych, które ma miejsce w spalarni odpadów oraz w przypadku ich wykorzystania w wielkim piecu. Widoczna różnica efektów cieplnych wynika z założenia, że w przypadku procesu wielkopieczowego otrzymane po etapie niepełnego spalania CO i H<sub>2</sub> pełnią rolę czynnika redukującego tlenki żelaza. Najwyższy stopień wykorzystania

tworzyw sztucznych osiąga się w wielkim piecu 79,6%, następnie w elektrowni 40%. W przypadku spalania do celów ogrzewania sprawność wykorzystania tworzyw sztucznych wynosi tylko 30%. Tworzywa sztuczne i guma dzięki wysokiej zawartości węgla (tabela 5) mogą pełnić również rolę nawęglaczy. Przykładowo, surowy polietylen o dużej gęstości (HDPE), zastosowany w roli nawęglacza wprowadził do kąpeli znacznie większą ilość węgla niż koks. Reakcja rozpuszczania węgla ma miejsce w pierwszych dwóch minutach – rys. 14. Wynika to z tego, że w reakcji biorą udział atomy węgla uwolnione wraz z częściami lotnymi w pierwszych minutach procesu.



**MATERIAŁ:** LDPE,HDPE,PP,PS,ABS

**WYDAJNOŚĆ:** 500-600 kg/h



**MATERIAŁ:** LDPE,HDPE,PP

**WYDAJNOŚĆ:** 120-150 kg/h



**MATERIAŁ:** LDPE,HDPE,PP,PS,ABS

**WYDAJNOŚĆ:** 220-280 kg/h



**MATERIAŁ:** PET

**WYDAJNOŚĆ:** do 360 kg/h



**MATERIAŁ:** LDPE,HDPE,PP

**WYDAJNOŚĆ:** 900-1100 kg/h



**MATERIAŁ:** : LDPE,HDPE,PP,PS,ABS

**WYDAJNOŚĆ:** 300-380 kg/h

Rys. 13. Linie technologiczne do recyklingu tworzyw sztucznych [10]

Fig. 13. Technological lines for plastic recycling [10]

Tablica 3. Skład chemiczny (% mas) węgla, oleju i odpadów tworzyw sztucznych [6]

Table 3. Chemical composition of coal, oil, and plastic waste (wt. %) [6]

Składnik	Pył węglowy	Olej opałowy	Odpady tworzyw sztucznych
C	79,60	85,90	77,81
H	4,32	10,50	11,99
S	0,97	2,23	0,90
Cl	0,20	0,04	1,40
K	0,2656	0,0010	0,0480
Na	0,0816	0,0010	0,0920
popiół	9,03	0,05	4,90

Tablica 4. Efekty stosowania tworzyw sztucznych jako czynnika ogrzewania i redukcji [6]

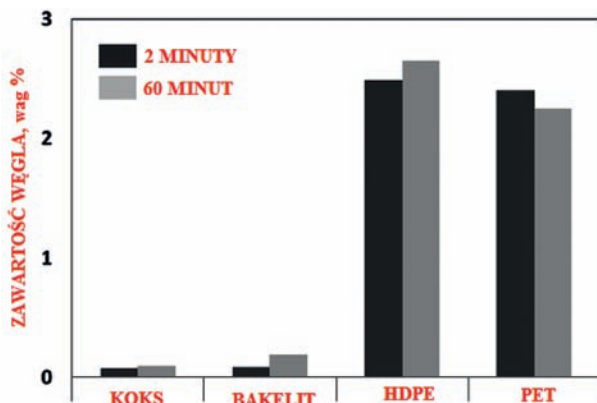
Table 4. Effect of using plastic waste as a heating and reduction agent [6]

Ogrzewanie – spalarnia odpadów	
<b>Gazyfikacja</b> $1/4 C_8H_8 + O_2 = 2O + H_2$	<b>Ciepło reakcji (MJ/kgmC)</b> + 8,21
<b>Spalanie</b> $2O + H_2 + 3/2 O_2 = 2O_2 + H_2O$	+ 31,40
<b>Suma</b>	<b>+ 39,61</b>
Redukcja tlenków żelaza (wielki piec)	
<b>Gazyfikacja</b> $1/4 C_8H_8 + O_2 = 2O + H_2$	<b>Ciepło reakcji (MJ/kgmC)</b> + 8,21
<b>Redukcja</b> $Fe_2O_3 + CO + H_2 = 2Fe + CO_2 + H_2O$	- 0,46
<b>Suma</b>	<b>+ 7,75</b>

Tablica 5. Analiza chemiczna koksu, HDPE, PET, gumy i bakelitu [13]

Table 5. Chemical analysis of coke, HDPE, PET, rubber and bakelite [13]

Składnik	100% Koks	100% HDPE	100% guma	100% PET	100% Bakelit
węgiel (%)	77,7	85,5	85,48	62,5	53,4
wodór (%)	1,11	14,2	6,96	4,2	4,0
siarka (%)	0,28	0,3	1,68	–	0,02
azot (%)	1,21	–	0,25	–	–
tlen (%)	–	–	6,7	33,3	11,6
wartość opałowa (MJ/kg)	28÷31	46,5	40,16	23,6	–



Rys. 14. Wpływ stosowanego nawęglacza (koks, 100% bakelit, 100% HDPE i 100% PET) na zawartość węgla po 2 i 60 minutach [13]

Fig. 14. Effect of carburise (coke, 100% Bakelite, 100% HDPE, and 100% PET) on carbon content after 2 and 60 min of reaction [13]

Zastąpienie węgla przez HDPE znacząco przyspiesza transfer węgla. Węgiel wprowadzony do stali może pełnić rolę składnika stopowego, ale również paliwa podczas świeżenia kąpieli tlenem [13].

#### 4.1. ZASTOSOWANIE ODPADÓW JAKO ŹRÓDŁA CIEPŁA W PROCESIE WIELKOPIECOWYM

Warunki panujące w komorze spalania wielkiego pieca, tj. wysoka temperatura (ok 2200°C) i atmosfera

utleniająca, sprzyjają procesom rozkładu i spalania węglowodorów. Tworzywa sztuczne zbudowane z węglowodorów mogą więc stanowić, po spełnieniu pewnych warunków, tani czynnik energetyczny zmniejszający zużycie drogiego koksu. Na rys. 15 zestawiono wyniki wpływu wdmuchiwania węgla, oleju oraz tworzyw sztucznych na temperaturę spalania przed dyszami wielkiego pieca. Jak widać wdmuchiwanie polistyrenu (PS) pozwala osiągnąć wyższą temperaturę spalania w porównaniu ze stosowaniem oleju, lecz jest ona z kolei niższa w porównaniu z wdmuchiowaniem węgla.

W ostatnich latach piece hutnicze zostały wykorzystywane do zagospodarowania odpadów z tworzyw sztucznych (OTS) w tym: polietylenu (PE), polipropylenu (PP), politereftalanu etylu (PET), polichlorku winylu (PCV), polistyrenu (PS).

Do głównych źródeł pozyskiwania odpadów tworzyw sztucznych można zaliczyć:

- odpady komunalne,
- odpady z rozbiórki zużytych samochodów,
- niezagospodarowane odpady poprodukcyjne.

Materiały odpadowe z różnych względów najczęściej nie nadają się do ich bezpośredniego wykorzystania. Decydować o tym mogą własności fizyczne, chemiczne i fizykochemiczne tych materiałów. Ważnymi własnościami fizycznymi odpadów są przede wszystkim:

- a) wielkość frakcji ziarnowych materiału,
- b) zawartość wilgoci w materiale.

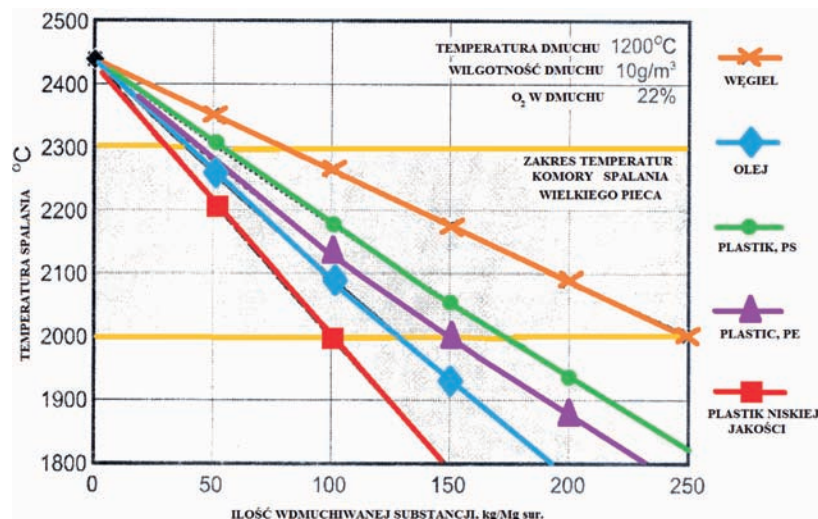
Własności chemiczne materiałów odpadowych związane są ze składem chemicznym i decydują o przydatności materiałów odpadowych dla określonego procesu technologicznego.

Istotny wpływ na ocenę przydatności stałych materiałów odpadowych dla różnych procesów technologicznych odgrywają ich własności fizykochemiczne. Możemy tu zaliczyć ich:

- a) własności powierzchniowe – zwilżalność materiału
- b) reakcyjność względem określonych substancji
- c) charakter struktury wewnętrznej – porowatość

W przypadku substancji ciekłych istotnymi parametrami fizykochemicznymi są lepkość oraz napięcie powierzchniowe.

Pierwszym etapem procesu recyklingu materiałów odpadowych w przemyśle stalowym są operacje wstępne mające na celu:



Rys. 15. Wpływ wdmuchiwania różnych substancji do komory spalania wielkiego pieca na temperaturę spalania [6]

Fig. 15. Effect of injection of various substances combustion chamber of blast furnace [6]



- zmniejszenie zawartości wody – operacje zagęszczania, filtrowania i suszenia.
- mieszanie i homogenizację mieszaniny materiałów. Proces ma na celu otrzymanie mieszaniny odpadów o dużym stopniu homogeniczności zapewniającej jednakowy skład ziarnowy i chemiczny w całej objętości.
- zbrzylenie materiałów miękich – spiekanie, grudkowanie, brykietowanie
- zmniejszenie poziomu zanieczyszczeń

W celu prawidłowego ponownego wykorzystania materiałów odpadowych należy opracować systematykę odpadów i zdefiniować grupy wyrobów o podobnych cechach i przydatności do procesów technologicznych.

Przed wprowadzeniem do wielkiego pieca odpady tworzyw sztucznych są wstępnie przygotowywane do ich wykorzystania (tablica 6) – rozdrabniane, topione i granulowane. Powstałe granulki przesyłane są do silosu. Następnie zostają wprowadzone do wielkiego pieca.

**Tablica 6. Wymogi stawiane odpadom tworzyw sztucznych do wielkiego pieca w hucie Bremen [6]**

**Table 6. Requirements posed the waste plastics into blast furnace in Bremen steelworks [6]**

Właściwości	Stawiane wymagania
wielkość ziarna	< 10 mm
podziarno < 250 µm	< 1% mas.
wilgotność	< 1% mas.
masa nasypowa	< 0,3 kg/dm <sup>3</sup>
zawartość chloru	< 2% mas.
popiół	< 4,5% mas. (w 650°C)
zawartość części metalicznych	< 1% mas.
zawartość plastiku	> 90% mas.
poliolefiny	> 70% mas.
plastik techniczny	< 4% mas.

Odpady tworzyw sztucznych można wprowadzać do wielkiego pieca 2 sposobami (rys. 16):

#### 1) podawać przez dysze

Powstałe granulki tworzyw sztucznych z silosa przechodzą do zbiornika dmuchawy skąd przez dysze są



**Rys. 16. Schematyczne przedstawienie możliwości wprowadzenia odpadów z tworzyw sztucznych do wielkiego pieca [7]**

**Fig. 16. Schematic representation of the introduction of waste plastics into blast furnace**

wdmuchiwane do wielkiego pieca. Granulat o średnicy 6–10 mm jest wprowadzany do wielkiego pieca przez urządzenie służące do jednoczesnego wdmuchiwania pyłu węglowego za pomocą dysz. Sposób ten wymaga przystosowania dysz do podawania granulatu z odpadów tworzyw sztucznych.

#### 2) bezpośrednio wprowadzić do wsady wielkopiecowego

Metoda ta pozwala na prawie bezinwestycyjne wykorzystanie odpadowych tworzyw sztucznych. Niewielkie nakłady finansowe związane są tylko z procesem rozdrabniania lub granulowania odpadów.

W Austrii (Voestalpine), Niemczech i Japonii powstały zintegrowane infrastruktury umożliwiające wykorzystanie odpadów tworzyw sztucznych jako paliwa i czynnika redukującego w wielkim piecu. Odpady te są dostarczane w postaci granulatu (poniżej 10 mm) otrzymanego zarówno z przemysłowych oraz postkonsumenckich odpadów (opakowania, zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny). Granulat ten jest transportowany rurociągami i podawany do pieca bezpośrednio poniżej strefy redukcji.

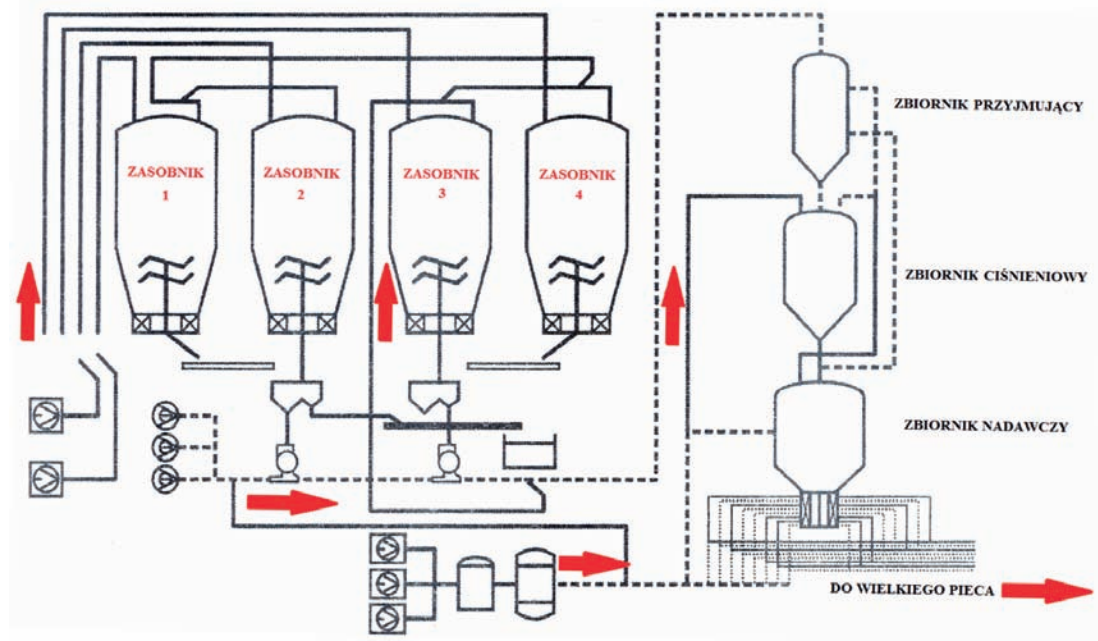
Mankamentem technologicznym procesu jest ograniczenie obecności PCV ze względu na zawartość chloru do 0,5% w granulacie OTS. Do wyprodukowania 1000 t surówki należy zużyć: ok. 370 t koksu oraz 90 t ropy naftowej. W zależności od składu rudy żelaza i rodzaju procesu technologicznego 90 t ropy można częściowo zastąpić przez 70 t OTS. Dla producenta stanowi to oszczędność ok. 150 000 t ropy naftowej rocznie. Zastosowanie 220 tys. ton odpadów z tworzyw sztucznych to: dodatkowe 880 000 m<sup>3</sup> przestrzeni na składowisku, oszczędność ponad 10 mln GJ energii, co odpowiada zapotrzebowaniu na energię do ogrzewania i podgrzewania wody dla ponad 400 tys. ludzi, wreszcie oszczędność emisji ponad 400 tys. ton CO<sub>2</sub> rocznie oraz redukcja gazów takich jak SO<sub>2</sub> i pyłów. W ten sposób technologia spalania odpadów z tworzyw sztucznych wpisuje się w strategię oszczędzania surowców naturalnych [14].

W hucie Bremen zainstalowano urządzenie do wdmuchiwania odpadów tworzyw sztucznych (rys. 17). Ma ono możliwość zużywania 230 Mg odpadów na dobę, maksymalna ilość wdmuchiwanego odpadów nie powinna przekraczać 35 kg/Mg surówki żelaza. Instalacja składa się z:

- stacji zasobników – magazynujących odpady tworzyw,
- trzech zbiorników systemu podawania tworzyw,
- armatura bezpośredniego wdmuchiwania tworzyw do wielkiego pieca.

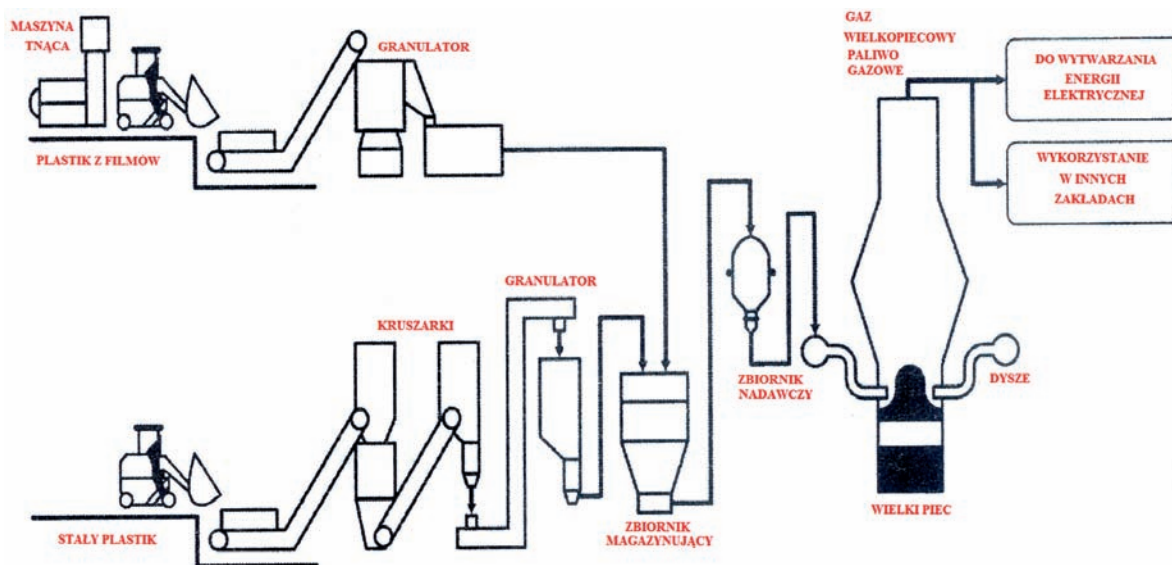
Prezentowany system zużywał około 200 Mg odpadów na dobę. Pozwoliło to na zmniejszenie zużycia oleju opałowego o 20%. Zużycie 1 Mg odpadów tworzyw sztucznych dało oszczędność 130 DM. W czasie prób przemysłowych wdmuchiwania odpadów do wielkiego pieca prowadzono pomiary emisji szkodliwych związków, m.in. dioksyn, CO, NO<sub>x</sub> i SO<sub>2</sub>. Emisja dioksyn zwiększa się w nieznacznym stopniu i nie przekracza 10% dopuszczalnej emisji wyznaczonej dla spalarni odpadów.

Również wyniki emisji CO, NO<sub>x</sub> i CO<sub>2</sub> wskazują, że utylizacja tworzyw sztucznych w procesie wielkopiecowym nie zwiększa stężeń tych związków w porównaniu z okresem pracy agregatu bez stosowania tworzyw i jest kilkakrotnie mniejsza od emisji dozwolonej przez normy.



Rys. 17. System wdmuchiwania odpadów tworzyw sztucznych w wielkim piecu w hucie Bremen [6].

Fig. 17. The injection of waste plastic in blast furnace in Bremen steelworks [6]



Rys. 18. System NKK wykorzystywania odpadów tworzyw sztucznych w wielkim piecu [6]

Fig. 18. NKK's system the use of plastic waste in blast furnace [6]

Przemysłowe próby wykorzystania zużytych tworzyw sztucznych w wielkim piecu podjęto także w japońskim koncernie metalurgicznym NKK- wykorzystano tu plastikowe elementy komputerów, butelki plastikowe, pojemniki na środki piorące, taśmy filmowe i taśmy magnetyczne (rys. 18). Oceniono że docelowo istnieje możliwość utylizacji do 600 tys. Mg/rok. Pomyślne próby przemysłowe przeszła również koncepcja utylizacji zużytych opakowań polietylenowych z nawozów sztucznych stosowanych w rolnictwie.

Istotną zaletą utylizacji odpadów tworzyw sztucznych w wielkim piecu jest to że nie wymagają one dużej czystości i sortowania. Ich składniki energetyczne zostaną utlenione i przejdą do fazy gazowej. Inne składniki natomiast zostaną zaabsorbowane przez fazę żużlową.

#### 4.2. WYKORZYSTANIE ODPADÓW TWORZYW SZTUCZNYCH W ŁUKOWYCH PIECACH ELEKTRYCZNYCH

Badania przydatności procesu EAF do utylizacji odpadów tworzyw sztucznych były prowadzone w uniwersyteckim ośrodku naukowym w Australii [17]. Wyniki badań pozwoliły stwierdzić, że efektywność spalania mieszanki w temperaturze 1200°C jest aż ok. 40-krotnie większa od efektywności spalania samego koksu. Węglowe pozostałości po spalaniu paliw stanowiły substytut paliwa węglowego wdmuchiwanego do żużla w procesie EAF dla jego spieniania.

Zużyte plastiki i gumę stosuje się jako paliwo również w piecach elektrycznych. Przykładowo: Testy technolo-

gii utylizacji plastików i gumy w Australijskim One-Steel Sydney Mill wykazały, że w zależności od wprowadzanych tworzyw można obniżyć zużycie energii elektrycznej od 10 KWh/t stali w przypadku gumy do 15 KWh/t stali w przypadku plastików jako składnik mieszanki z koksem. Ponadto obniżeniu uległo zużycia nawęglacza od 50 do 100 kg/wytop. Wdmuchiwanie rozdrobnionego plastiku odpowiednią lancą zapewniło spienienie żużla oraz redukcję zawartych w nim tlenków żelaza. Istotnym aspektem jest brak wzrostu poziomu emisji dioksyn, a nawet jak twierdzą autorzy ich obniżenie [18].

Tworzywa sztuczne i gumę ze zużytych opon używa się również do spieniania żużla w EAF. Technologia wprowadzania mieszanki takiej gumy i koksu do pieca elektrycznego, celem dostarczenia energii i spienienia żużla, była testowana w One Steel we współpracy z Uniwersytetem Nowej Południowej Walii w Australii. Obecnie staje się ona standardowym procesem w One-Steel Sydney i Laverton EAF Steel Mills w Australii. W efekcie zastosowania tej technologii w ponad 40 tys. wytopów rocznie zmniejszy się zużycie koksu o 13,7 tys. ton, a utylizacji poddanych zostanie ponad 1,1 mln opon dla samochodów osobowych. Przygotowuje się

dalsze wdrażanie tej technologii do nawęglania stali i spieniania żużla w UMC Steel Thailand w Tajlandii, a w perspektywie planuje wdrożenie w kolejnych stalowniach [19].

## 5. PODSUMOWANIE

Parametry technologiczne agregatów metalurgicznych, przede wszystkim wysoka temperatura procesów, stwarzają możliwości przetwarzania praktycznie wszystkich hutniczych materiałów odpadowych. Wykorzystanie tych możliwości może w dużej mierze wyeliminować potrzebę budowy odrębnych instalacji. Dzięki lepszej gospodarce zużytymi tworzywami sztucznymi oraz rosnącej świadomości społecznej ilość odpadów tworzyw sztucznych na składowiskach systematycznie maleje. Pełne wykorzystanie wartości odpadów tworzyw sztucznych wymaga łączenia różnych opcji gospodarki odpadami. Ważnym elementem gospodarki odpadami tworzyw sztucznych jest społeczna akceptacja zasady, że należy efektywnie wykorzystywać zasoby a odpady tworzyw sztucznych stanowią cenne surowce, których nie należy marnować na składowiskach.

## LITERATURA

1. Najlepsze dostępne techniki BAT wytyczne dla produkcji żelaza i stali huty zintegrowane, Ministerstwo Środowiska, Warszawa 2005
2. Lis T., Współczesne metody otrzymywania stali, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000
3. Sahajwalla V., Zaharia M., Kongkarat S., Khanna R., Saha-Chaudhury N., O'Kane P., Recycling Plastics as a Resource for Electric Arc Furnace (EAF) Steelmaking: Combustion and Structural Transformations of Metallurgical Coke and Plastic Blends, *Energy Fuels*, 2010, 24 (1), pp 379–391
4. Walendziewski J., Kałużński M., Surma A., Określenie potencjału odpadów i ich rodzaju do produkcji stałych paliw alternatywnych, Sieć Naukowo-Gospodarcza „Energia”, projekt Z/2.02/II/2.6/06/05, Wrocław 2007
5. Tworzywa sztuczne – fakty 2011, Analiza produkcji, zapotrzebowania oraz odzysku tworzyw sztucznych w Europie w roku 2010, coroczna publikacja europejskich producentów tworzyw sztucznych i ich partnerów, 20 edycja, 2011
6. Mróz J., Recykling i utylizacja materiałów odpadowych w agregatach metalurgicznych, Wydawnictwo P.Cz., Częstochowa 2006
7. [http://pl.wikipedia.org/wiki/Wielki\\_piec](http://pl.wikipedia.org/wiki/Wielki_piec)
8. Tworzywa sztuczne wokół nas – platforma edukacyjna, publikacja przygotowana przez Fundację PlasticsEurope Polska w oparciu o materiały źródłowe, Warszawa 2007
9. <http://www.flottweg.de/poland/linie-produktow/sorticanter/index.html>
10. <http://www.ptcas.pl/dzial,25,3,2,1,kompletne-linie-do-recyklingu.html#top>
11. <http://www.eko-region.pl/index.php?strona=pokaz&id=132>
12. <http://www.eko-region.pl/index.php?strona=pokaz&id=148>
13. Sahajwalla V., Zaharia M., Kongkarat S., Khanna R., Rahman M., Saha-Chaudhury N., O'Kane P., Dicker J., Skidmore C., Knights D., Recycling End-of-Life Polymers in an Electric Arc Furnace Steelmaking Process: Fundamentals of Polymer Reactions with Slag and Metal, *Energy Fuels*, 2012, 26 (1), pp 58–66
14. Maj M., Kalendyk B., Zapała R.: Nowoczesne metody recyklingu w przemyśle metalurgicznym, *ARCHIVES OF FOUNDRY ENGINEERING* Volume 10, Special Issue 2/2010, p. 103–106
15. Mróz J., Francik P.: Możliwości recyklingu materiałów odpadowych w stalowniczych konwertorach tlenowych, *Hutnik-Wiadomości Hutnicze*, nr 7, s. 374–378, 2007
16. Nomura S., Kato K., Nakagawa T., Komaki I.: The effect of plastic addition on coal caking properties during carbonization, *Fuel*, vol. 82, issue 14, p. 1775–1783, 2003
17. Sahajwalla V., Hong L., Saha-Chaudhury N.: Waste plastics – a resource for EAF steelmaking, *Iron & Steelmaking Technology*, April 2006, s. 91–96
18. Zaharia M., Sahajwalla V., Rahman M., Khanna R., Saha-Chaudhury N., O'Kane P., Skidmore C., Dicker J.: Improving energy efficiencies of electric arc furnace steelmaking through introduction of waste plastics and tyres: laboratory and plant trials. *Iron and Steelmaking: XVIII. International Scientific Conference*, 24-26.9.2008 Malenovice-Frýdlant nad Ostravicí, Czechy
19. Zheshi Jin: Innovative Use of Rubber Tyres and Plastics in EAF Steelmaking, *High Temperature Processing Symposium 2012*, Swinburne University of Technology 06-07 February 2012, Melbourne, Australia