

## ODZYSK MATERIAŁOWY W RECYKLINGU WIELOMATERIAŁOWYCH CZĘŚCI POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH JAKO ETAP WDRAŻANIA GOSPODARKI ZAMKNIĘTEGO OBIEGU

*Wymagania gospodarki odpadami oraz plan wprowadzenia gospodarki zamkniętego obiegu w Unii Europejskiej wywołują konieczność pełnego zagospodarowania odpadów z pojazdów wycofanych z eksploatacji. W szczególności dotyczy to odpadów części wielomateriałowych, które są coraz powszechniej stosowane w budowie pojazdów. Dotychczasowe sposoby zagospodarowania tych odpadów są nieefektywne. Spalanie w piecach cementowych i blokach energetycznych zagraża środowisku i zdrowiu. Jest również źródłem dodatkowego strumienia odpadów. Właściwym rozwiązaniem wydaje się niskotemperaturowa termoliza odpadów wielomateriałowych. W jej wyniku uzyskuje się surowce energetyczne i odzyskuje większość składników metalicznych i nieorganicznych. Udział części wielomateriałowych w konstrukcji pojazdów gwałtownie się zwiększa, toteż należy niezwłocznie wdrożyć efektywne metody zagospodarowania tych odpadów w dużej skali.*

### 1. WYMAGANIA PRAWNE I UWARUNKOWANIA ROZWOJU GOSPODARKI

Dyrektywa 2000/53/WE z 18 września 2000 r. [1] wprowadziła zasady zagospodarowywania pojazdów wycofanych z eksploatacji oraz produktów ich eksploatacji. W związku z koniecznością dostosowania prawa krajowego do wymagań UE Polska wprowadziła w życie stosowne przepisy, przyjmując ustawę z 20 stycznia 2005 r., zmienioną ustawą z dnia 27 maja 2015 r. o zmianie ustawy o recyklingu pojazdów wycofanych z eksploatacji oraz niektórych innych ustaw [2, 3]. Ustawy te zachowują generalne zasady określone w Dyrektywie.

Przepisy szczegółowe postawiły przed zakładami demontażu i gospodarki odpadami pochodzącymi z pojazdów i produktów ich eksploatacji oraz przed przedsiębiorstwami wprowadzającymi pojazdy do obrotu bardzo rygorystyczne warunki. Służą one minimalizacji szkodliwego oddziaływania tych odpadów na środowisko. W szczególności dotyczy to odpadów wielomateriałowych charakteryzujących się dużą trwałością, których recykling i przetwórstwo było bardzo długo w Polsce marginalizowane i pomijane w statystykach jako odrębna kategoria odpadów. Odpady te bardzo często spotykano na składowiskach odpadów komunalnych i nielegalnych wysypiskach. Dzięki wprowadzeniu od 1 stycznia 2015 roku obowiązku odzysku i recyklingu odpowiednio (w skali roku) na poziomie minimum 95% i 85% średniej masy pojazdu – zauważono ten problem, co dało perspektywę rozwoju oraz wdrożenia nowych technologii przetwarzania, a także odzysku materiałowego i produktowego. Jednocześnie dzięki temu segment zagospodarowania zużytych części i podzespołów pojazdów mechanicznych dołączył i wspomaga inicjatywy wdrażania gospodarki zamkniętego obiegu materiałowego. Koncepcja gospodarki zamkniętego obiegu (Circular Economy) polega na przerwaniu istniejącej dotychczas silnej zależności wzrostu gospodarczego od nieustannego powiększania zużycia surowców pierwotnych i energii. Rozdzielenie aktywności gospodarczej od wykorzystania zasobów naturalnych może nastąpić wyłącznie przez zwiększenie efektywności wykorzystania zasobów naturalnych i energii oraz rozbudowę branży odzysku materiałowego z

odpadów, opartą na wdrożeniu nowych, przyjaznych dla środowiska, efektywnych technologii, wdrożeniu właściwych norm jakości pozyskanych produktów wtórnych oraz włączeniu ich w regularny łańcuch dostaw dla przemysłu i usług.

Komisja Europejska podjęła w latach 2011-2014 i 2015 roku szereg ważnych inicjatyw w obszarze wydajności zasobowej. Prace zostały zakończone w grudniu 2015. Efektem jest opublikowany w grudniu 2015 Pakiet Gospodarki o Obiegu Zamkniętym [4] obejmujący propozycje zmian w dotychczas obowiązujących dyrektywach UE dotyczących gospodarki zasobami, energią i odpadami, prognozy oddziaływania społecznego, rynkowego i wpływu na rozwój zatrudnienia. Obecnie obowiązujące przepisy dotyczące zagospodarowania pojazdów wycofanych z eksploatacji doskonale wpisują się w projektowane ramy działań i po wprowadzeniu zmian w 2015 roku, nie wymagają istotnych modyfikacji [5].

### 2. ROLA ZAGOSPODAROWANIA ZUŻYTYCH CZĘŚCI WIELOMATERIAŁOWYCH Z POJAZDÓW WYCOFANYCH Z EKSPLOATACJI W REALIZACJI KONCEPCJI GOSPODARKI ZAMKNIĘTEGO CYKLU MATERIAŁOWEGO

Najefektywniejszym rodzajem odzysku zużytych części jest odzysk produktowy, który polega na ponownym użyciu części lub podzespołów, których stan techniczny oceniany jest jako spełniający wymagania bezpieczeństwa użytkowania w przypadku ich ponownego zastosowania po demontażu lub po procesie regeneracji/naprawy. Nie dotyczy to zatem części lub zespołów, których ponowne użycie mogłoby powodować zagrożenie bezpieczeństwa lub których stan techniczny czy estetyczny wyklucza ich ponowne użycie w pojazdach nowych lub naprawianych. W takich przypadkach stosuje się odzysk materiałowy, który obecnie pozwala na odzyskanie większości metali i stopów będących składnikami konstrukcji pojazdu. W wyniku takiego postępowania odzyskuje się materiały, które po przetworzeniu można wykorzystywać jako surowce w procesach produkcyjnych, najlepiej do pierwszego montażu [6,7]. Taka forma odzysku pozwala na oszczędność energii,

której wydatek byłby wielokrotnie wyższy w przypadku wytworzenia danego materiału z surowców pierwotnych. Stwierdzono, że dla metali oszczędność energii koniecznej do wytworzenia wyrobu z materiałów pozyskanych z odzysku jest o kilkadziesiąt procent wyższa. Porównanie ilości energii niezbędnej do wyprodukowania wybranych materiałów z surowców pierwotnych i wtórnych przedstawiono w tablicy 1 [8].

Tab. 1.

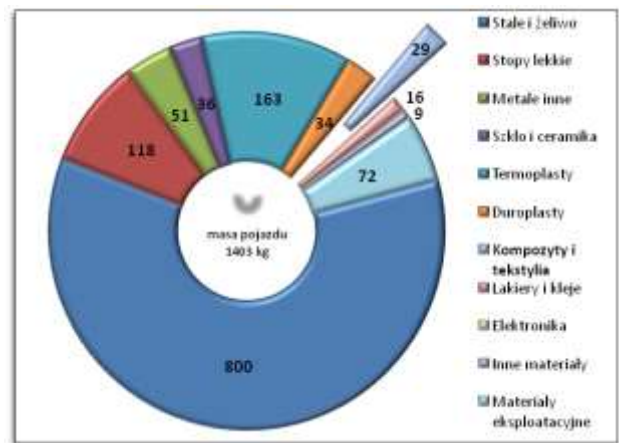
Zapotrzebowanie energii na wytworzenie i oszczędność energii z recyklingu materiałów (TJ/100000 t)			
Material	Z surowców pierwotnych	Z recyklingu	Oszczędność w produkcji 100 tys. ton
Aluminium	4700	240	4460
Miedź	1690	630	1360
Stopy żelaza	1400	1170	230
Ołów	1000	13	987
Nikiel	2064	186	1878
Cyna	1820	20	1800
Cynk	2400	1800	600
Papier	3520	1880	1640

W przypadku polimerów oszczędność ta wynosi od kilkunastu do sześćdziesięciu procent. W odniesieniu do produktów wielomateriałowych, których trwałość jest znaczna, a odzysk produktowy jest niemożliwy lub nieopłacalny ekonomicznie stosuje się częściowy odzysk materiałowy oraz odzysk energetyczny. Umożliwia to odzyskanie energii cieplnej zawartej w materiałach organicznych, których wykorzystanie w inny sposób jest niemożliwe ze względów technicznych. W procesach recyklingu materiałowego stosuje się różnorodne metody odzysku, często w sposób kaskadowy w celu jak najpełniejszego odzysku materiałów i energii z odpadów poeksploatacyjnych.

Najczęściej stosowane metody to:

1. recykling mechaniczny, który polega na przetwarzaniu odpadów, bez stosowania procesów chemicznych, stosuje się go do elastomerów niewulkanizujących i termoplastów bez istotnego udziału w ich strukturze materiałów nieorganicznych, włókien i metali,
2. recykling chemiczny, polegający na degradacji łańcuchów polimerowych metodami chemicznymi, prowadzonymi najczęściej w podwyższonej temperaturze, w celu otrzymania związków małocząsteczkowych, służących następnie do wytwarzania innych produktów (grupa ta obejmuje również proces dewulkanizacji gumy),
3. recykling termiczny, polegający na termicznym rozkładzie polimerów, elastomerów i włókien celulozowych (tkanin) do postaci związków o krótszych łańcuchach merowych (frakcja gazowa i ciekła - paliwa) w procesie destylacji polimerów oraz na częściowej karbonizacji materiałów organicznych w sekwencyjnie przebiegającym procesie kondensacji i odwodnienia kondensatów (frakcja stała w postaci karbonizatu oraz różnorodnych materiałów nieorganicznych i metali).

Udział elementów wielomateriałowych w konstrukcji nowoczesnego pojazdu jest znaczny. Procentowy udział tworzyw sztucznych i polimerowych materiałów kompozytowych wynosi ok. 8,2% ogólnej masy samochodu, natomiast udział tekstyliów zawartych w częściach wyposażenia i w oponach stanowi 1,2%. Udział poszczególnych grup materiałów we współczesnym popularnym samochodzie osobowym o masie około 1403 kg pokazano na rysunku 1. Zawartość materiałów kompozytowych i wielomateriałowych dochodzi tu do 29 kg [9].



Rys. 1. Udział poszczególnych grup materiałów w budowie współczesnego samochodu osobowego.

W skład części wielomateriałowych i kompozytów wchodzi elastomery, polimery termo- i chemoutwardzalne, elementy metalowe, w tym folia aluminiowa, drut stalowy, włókna, maty i tkaniny, jak również włókna naturalne i mineralne, jak juta, sizał, konopie, wełna, len, włókno szklane, aramidowe, wollastonit, whiskersy tlenków i azotków metali. Ponadto wiele części szybko zużywających się podczas eksploatacji pojazdu wykonuje się również z wielu materiałów, których rozdzielenie jest trudne lub niemożliwe. Są to filtry powietrza, paliwa i oleju, filtry kabinowe, pompy wodne, paski napędowe, przewody hydrauliczne. Najbardziej istotnym komponentem wielomateriałowym podlegającym okresowej wymianie są opony samochodowe. Instalacje elektryczne i układy elektroniczne oraz przewody elektryczne stanowią odrębną klasę podzespołów i części, które zgodnie z propozycją nowej dyrektywy będą podlegać odzyskowi produktowemu i materiałowemu obowiązującemu dla ZSEE (zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny). W konstrukcji pojazdów coraz częściej stosuje się także włókna polimerowe (nylon), szklane i węglowe oraz kord stalowy. Typowe materiały używane w konstrukcji pojazdów różnych marek (bez identyfikacji), które podlegają jednostkowej zbiórce w zakładach zagospodarowania i utylizacji odpadów przedstawia Tablica 2. Stosowane dotychczas na szeroką skalę spalanie/współspalanie odpadów wielomateriałowych (np. jako RDF) wiąże się z emisją gazów cieplarnianych, jak również z dodatkowymi, kosztownymi operacjami, związanymi z przygotowaniem wsadu (np. cięcie, strzępienie, prasowanie, odpylanie, brykietowanie). W celu usprawnienia tych operacji konstruowane są zintegrowane urządzenia i linie produkcyjne, przetwarzające odpady na granulaty RDF9 (Rys. 2), używany głównie w energetyce i w przemyśle cementowym.

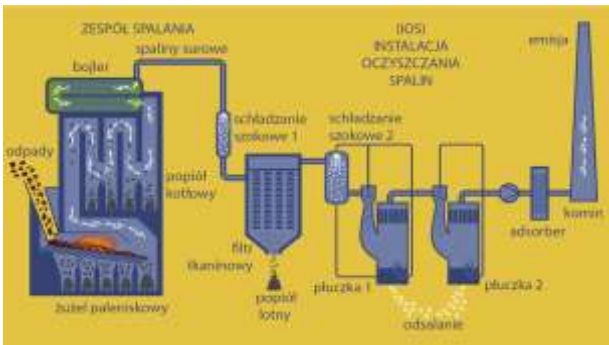


Rys. 2. Instalacja do przetwarzania odpadów wielomateriałowych w ZUOK w Jańcycach (Sutco).

**Tab. 2. Procentowy udział materiałów stosowanych w budowie obecnie produkowanych i demontowanych pojazdów wycofanych z eksploatacji (bez identyfikacji marki i modelu).**

Udział w masie pojazdu	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Stal konstrukcyjna	40.8%	40.4%	39.8%	40.1%	40.2%	38.0%	36.8%	35.8%	35.1%	34.0%	34.5%
Stal stopowa	13.8%	12.1%	12.3%	12.6%	12.9%	13.3%	14.0%	15.1%	15.8%	16.0%	16.2%
Stal nierdzewna	1.7%	1.8%	1.8%	1.8%	1.9%	1.7%	1.8%	1.8%	1.7%	1.9%	1.8%
Inne stале	0.8%	0.9%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%	0.8%
Zelazo	8.2%	8.1%	8.1%	7.8%	6.3%	5.2%	6.1%	6.5%	6.9%	6.9%	6.8%
Stopy aluminium	7.7%	7.8%	7.9%	7.8%	7.8%	8.2%	8.5%	8.8%	9.2%	9.5%	10.0%
Stopy magnezu	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%
Miedź i stopy miedzi	1.8%	1.8%	1.6%	1.6%	1.8%	1.8%	1.9%	1.8%	1.8%	1.8%	1.8%
Cinok	0.9%	0.9%	1.0%	1.0%	1.1%	1.1%	1.0%	1.0%	0.9%	0.9%	0.9%
Stopy cynku	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
Spieki metali	1.1%	1.0%	1.0%	1.0%	1.1%	1.0%	1.0%	1.0%	1.1%	1.1%	1.2%
Inne metale	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
Półprzewodniki i kompozyty	8.4%	8.3%	8.4%	8.2%	8.6%	9.7%	9.0%	8.7%	8.5%	8.3%	8.2%
Elastomery i gumy	4.3%	4.5%	4.9%	4.7%	5.0%	6.2%	5.8%	5.6%	5.3%	5.1%	4.9%
Powłoki	0.7%	0.7%	0.7%	0.7%	0.8%	0.9%	0.9%	0.8%	0.7%	0.7%	0.7%
Tekstylna	1.3%	1.2%	1.2%	1.1%	1.1%	1.5%	1.4%	1.2%	1.3%	1.3%	1.2%
Plastyk	5.2%	5.2%	5.2%	5.2%	5.2%	5.5%	5.5%	5.5%	5.6%	5.7%	5.6%
Skło	2.6%	2.6%	2.6%	2.5%	2.4%	2.2%	2.3%	2.4%	2.4%	2.4%	2.4%
Inne materiały	2.1%	2.2%	2.2%	2.2%	2.3%	2.3%	2.3%	2.3%	2.3%	2.3%	2.3%

Zastosowanie paliw alternatywnych wytwarzanych z odpadów wielomateriałowych wymaga również dodatkowych kosztownych instalacji służących minimalizacji wpływu spalin i popiołów na środowisko (np. skrubery, sita, filtry, płuczki), jak pokazano na schemacie – rysunek 2, tworzących rozbudowaną infrastrukturę, projektowaną i budowaną przez wyspecjalizowane firmy – rysunek 3. Działanie tych instalacji pochłania znaczną ilość energii, toteż mimo niewątpliwie dodatniego wyniku finansowego, efektywność energetyczna procesów spalania odpadów wielomateriałowych może okazać się niewielka. Zgodnie z programem wdrażania gospodarki zamkniętego cyklu powinno się dążyć do optymalizacji odzyskiwania energii. Dlatego należy unikać prostego spalania materiałów organicznych, które wiąże się ze zwiększoną emisją spalin, cząstek stałych, pary wodnej i dwutlenku węgla do atmosfery w zamian otrzymując energię ciepłą, która dopiero może być przekształcona na energię elektryczną ze sprawnością procesu bliską 30%.



**Rys. 3. Schemat instalacji oczyszczania spalin bloku energetycznego zasilanego paliwem z odpadów wielomateriałowych. [10]**



**Rys. 4. Instalacja oczyszczania spalin bloku Elektrociepłowni Wrocław. [11]**

Należy traktować materiały organiczne bardziej kompleksowo, jako pewnego rodzaju zasobnik energii i przetwarzać je na zasoby koncentrujące energię w formie ciekłej - oleje opałowe i napędowe oraz gaz energetyczny, tak jak miało to miejsce w przypadku powstawania pierwotnych źródeł energii, które tworzyły się w wyniku długotrwałych naturalnych procesów biochemicznych i biofizycznych. Technologie, które spełniają postawione wymagania są technologiami opartymi na metodach termicznego rozkładu materiałów organicznych. Metody termicznego rozkładu stosowane do zagospodarowania i utylizacji odpadów przedstawiono na schemacie (Rys. 5).



**Rys. 5. Przegląd metod termicznej obróbki i przetwarzania odpadów.**

Procesy rozkładu termicznego przeprowadza się bez dostępu powietrza. Temperaturę i przebieg procesu dobiera się stosownie do pożądanej kompozycji produktów rozkładu.



**Rys. 6. Urządzenie do pirolizy opon i wielomateriałowych odpadów użytkowych z wymiennymi komorami reakcyjnymi – Eko-Kon Sp. z o.o. w Bojanie.**

W przypadku termolizy (320 – 490 °C) części wielomateriałowych pochodzących z pojazdów wycofanych z eksploatacji, które składają się z nierozdzielnie połączonych materiałów organicznych (polimery, elastomery, tkaniny, pianki) i materiałów metalowych oraz niemetalowych (ceramika, włókno szklane, włókno węglowe, wypełniacze nieorganiczne) następuje przetworzenie materiałów organicznych na nośniki energii w postaci olejów, będących mieszaniną ciekłych węglowodorów i węglowodorów gazowych (gaz palny) [12]. W wyniku procesu termolizy następuje rozdzielanie elementów metalowych i niemetalowych, po czym trafiają one do właściwych strumieni przetwarzania materiałów wtórnych. Procesy przebiegające w wyższym zakresie temperatur (500 – 1200 °C) prowadzą do utworzenia produktów węglowodorowych o mniejszej masie cząsteczkowej, aż do powstania pełnego zgazowania wszystkich materiałów organicznych (gaz pirolityczny). Przykład urządzenia do pirolizy przeprowadzanej w wyższym zakresie temperatur przedstawiono na rysunku 6.

### 3. ODZYSK MATERIAŁOWY METODĄ TERMOLIZY

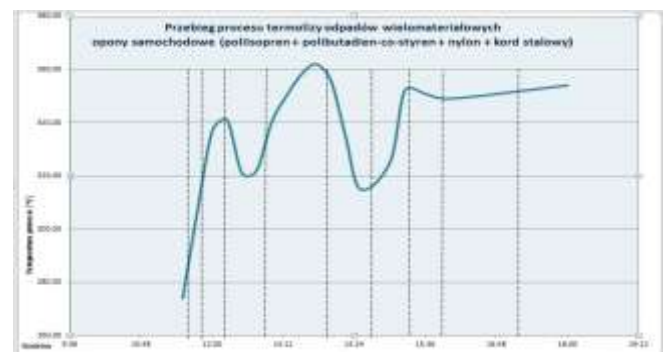
Obecnie najbardziej obiecującą z punktu widzenia ekonomiki i logistyki odzysku oraz recyklingu materiałowego, jak również ze względu na możliwość szybkiego rozwiązania problemów wynikających ze składowania użytkowych i poprodukcyjnych odpadów wielomateriałowych, wydaje się technologia polegająca na beztlenowym procesie termolizy [13]. Jest ona również w porównaniu do metod mechanicznych i chemicznych (dewulkanizacja elastomerów, degradacja polimerów za pomocą rozpuszczalników organicznych) najbardziej przyjazna dla środowiska. Rozkład termiczny metodą termolizy polega na rozpadzie cząsteczek związków chemicznych (organicznych) na mniejsze cząsteczki (łańcuchy merowe) pod wpływem temperatury. Im słabsze jest wiązanie chemiczne w cząsteczce, tym niższa jest temperatura, w której dysocjacja termiczna zachodzi. Proces termicznego rozkładu prowadzi się w podgrzewanym pośrednio (przeponowo) poziomym reaktorze z ruchomym, powoli obracającym złożem ( $0 \div 0,5$  obr/min). Umieszczone w reaktorze wieloskładnikowe odpady podgrzewa się do temp.  $320 \div 480^\circ\text{C}$  bez dostępu powietrza (tlenu i azotu) i przy naturalnie wzrastającym ciśnieniu, wynoszącym max. 40 kPa (0,4 bar). W wyniku tak prowadzonego procesu powstają opary olejowo-gazowe, podlegające separacji w połączonym z reaktorem separatorze i w zbiornikach skraplaczy.

W efekcie procesu nagrzewania otrzymuje się mieszaninę węglowodorów, wypływających z reaktora po odpowiednim schłodzeniu w postaci frakcji ciekłych węglowodorów i mieszaniny gazów palnych. W reaktorze pozostaje frakcja stała, złożona z karbonizatu (węgiel komórkowy) oraz złomu metalowego i składników ceramicznych, które mogą wchodzić w skład materiałów poddanych termolizie. Przykłady produktów termolizy pokazano na rysunku 7. Do zalet procesu termolizy odpadów należy zaliczyć niewielkie zanieczyszczenie powietrza oraz zredukowanie objętości odpadów o 90% [12]. Przykładowy proces rozkładu termicznego odpadów wielomateriałowych prowadzony poprzez poddawanie ich działaniu wysokiej temperatury, bez kontaktu z tlenem i innymi czynnikami utleniającymi pokazano na wykresie (Rys. 8).

Cykliczne zmiany temperatury procesu przy stałym poziomie energii cieplnej dostarczanej do reaktora spowodowane są rodnikowo-łańcuchowym mechanizmem termolizy. Dzięki sekwencyjnie przebiegającym indukowanym procesom rozpadu na rodniki i na skutek polimeryzacji w krótkie łańcuchy węglowodorowe, podlegające następnie destylacji tworzy się mieszanina ciekłych (oleje) i gazowych (gaz palny) węglowodorów. Z kolei dzięki powierzchniowemu odwodornieniu i kondensacji krótkich łańcuchów polimerów na odwodornionej przez rodniki powierzchni materiałów o uporządkowanej strukturze bipolarnej syndiotaktycznej następuje stopniowa karbonizacja materiałów organicznych, które w warunkach termodynamicznych termolizy nie ulegają już dalszym przemianom chemicznym, tworząc struktury węgla komórkowego o teksturze predefiniowanej przez formę materiału, który podlega obróbce (pianki, lamelki, płytki, igły, włókna). Struktury te na skutek przesypywania w obracającej się komorze reaktora oraz wskutek naprężeń cieplnych wywołanych gradientem temperatur podczas końcowego schłodzenia reaktora do temperatury pokojowej, ulegają częściowej destrukcji, tworząc produkt w postaci węglowego proszku lub płatków. Właściwości karbonizatu otrzymanego z termolizy elastomerów i polimerów wchodzących w skład odpadów poeksploatacyjnych zestawiono w tabeli 3. W procesie rozkładu termicznego np. opon samochodowych można uzyskać około  $20 \div 35\%$  karbonizatu,  $35 \div 65\%$  oleju oraz  $10 \div 20\%$  frakcji gazowej i  $10 \div 25\%$  kordu stalowego.



Rys. 7. Stałe produkty termolizy odpadów wielomateriałowych przed i po wyjęciu z reaktora.



Rys. 8. Przykładowy przebieg procesu termolizy materiałów wielomateriałowych – opony sam. [14]

Przykładem urządzenia do termicznego rozkładu metodą bez-tlenową jest instalacja opracowana przez polską firmę WGW Green Energy Poland Sp. z o. o., przedstawiona na rysunku 9, przeznaczona do odzysku energii i surowców z odpadów poużytkowych wykonanych z dowolnych materiałów organicznych, również z po-eksploatacyjnych odpadów wielomateriałowych, których przykłady pokazano na rysunku 10.



**Rys. 9.** Przemysłowa instalacja do odzysku materiałowego i energetycznego z obrotową poziomą komorą reakcyjną – WGW Green Energy Sp. z o.o.



**Rys. 10.** Wielomateriałowe odpady ze zużytych pojazdów przeznaczone do odzysku materiałowego i energetycznego.

Wstępne badania przeprowadzone podczas pilotażowych procesów technologicznych pozwoliły na określenie właściwości produktów termolizy, a w szczególności karbonizatu, będącego strukturalnie odmianą węgla komórkowego o teksturze predefiniowanej przez materiał organiczny, który podlegał procesowi karbonizacji. Właściwości zestawiono w tabelicy 3 i 4. Szczególnie istotne jest uzyskanie produktów o wysokiej porowatości (196 m<sup>2</sup>/g rozwiniętej powierzchni), perspektywicznych jeśli chodzi o możliwości ich zastosowania, szczególnie jako sorbenty tj. pochłaniacze np. ropopochodnych wycieków w akwenach wodnych, surowiec do produkcji pigmentów, tuszów do drukarek, czy jako suche pochłaniacze (filtry) niebezpiecznych składników spalin (np. związków siarki) jak również jako substytut sadzy niezbędny do produkcji wyrobów gumowych.

**Tab. 3.** Przykładowe właściwości karbonizatu z procesu termolizy opon samochodowych. [12]

Właściwości	Wyniki badań
Wilgotność	1,1 % (max. 24%)
Przesiew na siatce	głównie poniżej 1 mm
Zawartość węgla	80,7+89,4 %
Zawartość części lotnych	3,2+9,9 %
Ciepło spalania	27,25+31,1 MJ/kg

**Tab. 4. Zawartości pierwiastków w karbonizacji z opon [opracowanie własne].**

Lp.	Zawartości pierwiastków w karbonizacji z opon	Wynik pomiaru [% (m/m)]
1	Glin	0,17
2	Wapń	0,70
3	Chrom, Mangan, Molibden, Nikiel, Tytan, Wanad	poniżej 0,01
4	Miedź	0,02
5	Żelazo	0,36
6	Magnez	0,07
7	Fosfor, Cyna	poniżej 0,05
8	Ółów	poniżej 0,02
9	Cynk	4,06
10	Węgiel	82,56

Rozkład termiczny substancji poddawanych obróbce polega na oddziaływaniu na te substancje wysokiej temperatury, bez kontaktu z tlenem i innymi czynnikami utleniającymi [12]. W wyniku procesu długie wiązania alifatyczne rozpadają się na monomery, a powstające opary olejowo-gazowe, które przemieszczają się odpowiednio w obrębie szczelnej instalacji (obieg zamknięty), podlegają separacji w zbiornikach sekcji skraplaczy, w efekcie której otrzymuje się frakcję ciekłą i gazową produktów rozkładu. Produkty te mogą stanowić surowiec do produkcji paliw. W reaktorze pozostaje frakcja stała, w której skład wchodzi karbonizat (pozostałe domieszki stanowią głównie związki węgla) oraz złom metalowy, jeśli wsad zawierał takie materiały.

Rozpowszechnienie tej lub podobnych technologii może stanowić element systemu dywersyfikacji źródeł energii oraz działalności prokonsumenckiej.

#### 4. ZAGOSPODAROWANIE PRODUKTÓW ODZYSKU MATERIAŁOWEGO I ENERGETYCZNEGO WIELOMATERIAŁOWYCH ODPADÓW POKSPOŁACYJNYCH

Zagospodarowanie olejów i gazu palnego, powstających w procesie termolizy jest określone przez bieżące potrzeby techniczne i wymagania prawne. Produkty te można bezpośrednio wykorzystać do ogrzewania reaktora podczas procesu termolizy (podtrzymanie temperatury procesu). Można je również przetworzyć na paliwo lub olej opałowy drogą dalszej obróbki.

Karbonizat, charakteryzujący się cennymi właściwościami mechanicznymi, sorpcyjnymi i cieplnymi znajduje dotychczas szerokie zastosowanie w następujących obszarach technicznych:

1. napelniacz, utwardzacz i stabilizator przemysłowych wyrobów gumowych, takich jak przewody hydrauliczne, węże, uszczelki, membrany, amortyzatory drgań, zderzaki i osłony urządzeń, podstawy i dywaniki;
2. składnik nawierzchni bitumicznych, poliuretanowych i gumowych;
3. składnik opakowań szczelnych i antyelektrostatycznych;
4. sorbent komórkowy, przeznaczony na przykład do eliminacji jonów chromu sześciowartościowego i rtęci z roztworów wodnych, zwłaszcza ścieków przemysłowych.

Obecnie w kilku laboratoriach korporacyjnych oraz w ośrodkach badawczo-rozwojowych trwają badania nad zastosowaniem karbonizatu w postaci płatków i płytek jako składnika materiałów kompozytowych o właściwościach tłumiących drgania, a także jako składnika materiałów o osnowie metalowej do elektrosorpcji i desorpcji gazów [15, 16, 17].

#### PODSUMOWANIE

Wymagania gospodarki odpadami w Unii Europejskiej oraz plan ekonomiczno-technologicznej przebudowy gospodarki Unii, sformułowany w Komunikacie Komisji Europejskiej do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów: „Ku gospodarce o obiegu zamkniętym: program zero odpadów dla Europy”, powodują konieczność podjęcia intensywnych prac badawczo-wdrożeniowych w celu jak najszybszego wprowadzenia do praktyki metod odzysku materiałów z części poeksploatacyjnych, których recykling jest dotychczas trudny technicznie lub nieopłacalny. W szczególności dotyczy to części pojazdów wycofanych z eksploatacji, które prawo ochrony środowiska zakwalifikowało w całości do grupy odpadów niebezpiecznych.

Produktowy i materiałowy odzysk części metalowych nie sprawił istotnych trudności technicznych i organizacyjnych. Ze względu na bezpośrednie zagrożenie dla środowiska udało się również skutecznie rozwiązać problem odzysku i unieszkodliwiania komponentów baterii i akumulatorów oraz elementów zasilania elektrycznego i podzespołów elektronicznych. Natomiast kwestia efektywnego zagospodarowania elementów wielomateriałowych, zarówno wielowarstwowych, jak kompozytowych nadal pozostaje trudne do rozwiązania. W ostatnim okresie gwałtownie wzrasta udział komponentów wielomateriałowych w konstrukcji pojazdów. Spowodowane jest to tendencją do zwiększenia efektywności energetycznej pojazdów poprzez zmniejszenie ich masy oraz poprzez zapewnienie mniejszej energochłonności i mniejszych kosztów produkcji w miejscu wytwarzania części (elastyczność produkcji). Dotyczy to nie tylko wyposażenia, lecz również samej konstrukcji pojazdu, bowiem przez wykorzystanie zintegrowanych elementów skorupowych (powłokowych) zwiększa się swoboda projektowania pojazdów z wykorzystaniem metod CAD/CAE i upraszczają się operacje ich montażu. Dzięki postępowi inżynierii materiałowej w dziedzinie włókien szklanych, mineralnych i węglowych oraz technologii wytłaczania, prasowania i wtrysku materiałów kompozytowych, wytrzymałość takich konstrukcji nie odbiega od odpowiadających im funkcjonalnie podzespołów wykonanych z tłoczonej i zgrzewanej blachy stalowej. Dlatego też należy liczyć się z narastaniem nierozwiązanego dotychczas problemu zagospodarowania wielomateriałowych części pojazdów wycofanych z eksploatacji. Jedynym obecnie liczącym się gospodarczo rozwiązaniem jest spalanie tych odpadów w paleniskach pieców cementowych lub w blokach energetycznych. Jest to rozwiązanie nieefektywne energetycznie i powodujące powstawanie nowego strumienia trudnych do zagospodarowania odpadów w postaci żużli i popiołów. Żużel zawiera metale i składniki mineralne, których odzyskanie z tej postaci jest bardzo trudne lub praktycznie niemożliwe. Ponadto przy dużym udziale takich materiałów w paliwie energetycznym spalonym w powietrzu, należy liczyć się z powstawaniem szkodliwych emisji do atmosfery w postaci WWA oraz innych pochodnych węglowodorów aromatycznych (dioksyn, furanów, etc). Efektywną alternatywą wydaje się odzysk materiałowy i energetyczny metodą termolizy, będącej niskotemperaturową odmianą pirolitycznego rozkładu substancji organicznych. Proces ten odbywa się bez udziału powietrza w hermetycznie zamkniętym reaktorze, co sprawia, że nie jest on źródłem emisji trujących i szkodliwych związków organicznych. Badania i próby technologiczne przeprowadzone przez Instytut Mechaniki Precyzyjnej przy współudziale firmy GWG Green Energy Poland, producenta nowoczesnych, zautomatyzowanych instalacji do termolizy odpadów, wykazały, że produkty termolizy mogą stanowić surowce do wytwarzania paliw przewyższające lub nie odbiegające jakością od produktów rafinacji ropy naftowej i gazu ziemnego.

Ponadto ze względu na umiarkowane temperatury obróbki nie przekraczające 490 °C, a w większości przypadków 400 °C, wszystkie materiały metalowe i włókna zawarte w częściach i/lub podzespołach można poddawać recyklingowi. Prowadzone obecnie badania wskazują, że karbonizat, będący jednym z produktów termicznego rozkładu substancji organicznych, może stać się w niedalekiej przyszłości cenionym materiałem technicznym. Podczas procesu technologicznego na zewnątrz instalacji termolizy emitowana jest wyłącznie para wodna. Obecnie o warto zaznaczyć, trwają prace nad projektem technologii i urządzenia do przetwarzania wielkogabarytowych odpadów wielomateriałowych – stanowiących wielki problem w gospodarce odpadami.

Zagospodarowanie wielomateriałowych części pojazdów wycofanych z eksploatacji zostanie ułatwione po zmianach, które nastąpią w motoryzacji rozwiniętych regionów świata przed rokiem 2030. Coraz szersze zastosowanie pojazdów o napędzie elektrycznym spowoduje uproszczenie konstrukcji pojazdów, eliminując tym samym konieczność stosowania wielu części funkcyjnie związanych z mechanicznym przenoszeniem napędu, regulacją prędkości, hamowaniem, chłodzeniem silnika, dozowaniem paliwa etc. Wiele podzespołów i części podlegać będzie postępowaniu ZSEE. Ze względu na upowszechnienie pojazdów bezobsługowych (w tym autonomicznych) i systemu leasingu prawdopodobnie zmniejszy się również ilość części służących eliminacji ryzyka wynikającego z kierowania pojazdem i obsługi codziennej przez jego użytkownika. Dzięki takim zmianom zagospodarowanie wielomateriałowych odpadów z pojazdów wycofanych z eksploatacji będzie można łatwiej standaryzować, stosując do właściwych grup materiałów odpowiednie technologie, służące maksymalnemu odzyskowi produktowemu, materiałowemu i ewentualnie energetycznemu.

## BIBLIOGRAFIA

1. Dyrektywa 2000/53/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 września 2000 r. w sprawie pojazdów wycofanych z eksploatacji.
2. Ustawa o recyklingu pojazdów wycofanych z eksploatacji (Dz.U. 2005 Nr 25 poz. 202).
3. Ustawa z dnia 27 maja 2015 r. o zmianie ustawy o recyklingu pojazdów wycofanych z eksploatacji oraz niektórych innych ustaw (Dz.U. 2015 poz. 933).
4. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy, COM(2015) 614 final.
5. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directives 2000/53/EC on end-of-life vehicles, 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators, and 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment, COM(2015) 593 final, 2015/0272(COD).
6. Wojciechowski A., Recykling samochodów. Materiały i technologie odzysku; Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa 2012; str. 23-31.
7. Małuszyńska I., Bielecki B., Wiktorowicz A., Małuszyński M., Recykling materiałowy i surowcowy odpadów samochodowych, Inżynieria Ekologiczna Nr 28, 2012.
8. Report on the Environmental Benefits of Recycling, Bureau of International Recycling (BIR), Centre for Sustainable Production & Resource Efficiency (CSPRE), Imperial College London 2008.
9. Stauber R. C., Das Automobil der Zukunft - Chancen und Anforderungen an Kunststoffe und Kunststofftechnologie, Kunststoffe im Automobilbau, VDI - Verlag 2009.
10. Przerób i Utylizacja Odpadów - Projekt Tłumaczenie podręcznika pt.: „Sprawdzone metody gospodarowania odpadami komunalnymi”, BRD Umweltbundesamt, dofinansowany ze środków Wojewódzkiego

Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Olsztynie, Stowarzyszenie Technologii Ekologicznych SILESIA.

11. [http://www.rafako.com.pl/centrum-prasowe/komunikaty-prasowe /- /16567](http://www.rafako.com.pl/centrum-prasowe/komunikaty-prasowe/-/16567): 14 sierpnia 2015, KOGENERACJA uruchomiła we Wrocławiu nowoczesną instalację oczyszczania spalin.
12. Wojciechowski A.; Doliński A., Dywersyfikacja źródeł energii z odzysku materiałowego poeksploatacyjnych i poprodukcyjnych odpadów organicznych, Międzynarodowa Konferencja Naukowa „ENERGIA I ŚRODOWISKO Produkcja – Logistyka – Zarządzanie”. 9-10 października 2014 r. w Lublinie. Wyd. Logistyka 6/2014 s. 366-377.
13. Wojciechowski A., Żmuda W., Doliński A., Krzak M., Unieszkodliwienie wielomateriałowych odpadów poeksploatacyjnych metodą rozkładu termicznego, XII Konferencja Naukowo-Techniczna: Logistyka, Systemy Transportowe, Bezpieczeństwo w Transporcie. LogiTrans 2015, Szczyrk 20-23.04.2015. Wyd. Logistyka 3/2015.
14. Dolińska K., Recycling of used elastomeric parts from vehicles, Thesis on the Faculty of Civil and Environmental Engineering Warsaw University of Life Sciences, January 2016.
15. Wójtowicz Marek A., Cosgrove Joseph E., Serio Michael A.: Carbon-Based Regenerable Sorbents for the Combined Carbon Dioxide and Ammonia Removal for the Primary Life Support System (PLSS), 44th International Conference on Environmental Systems ICES-2014-241, 13-17 July 2014, Tucson, Arizona.
16. Serio, M.A., Cosgrove, J.E., Wójtowicz, M.A., Wignarajah, K., and Fisher, J., Methane Production from Pyrolysis of Mixed Solid Wastes, 42nd International Conference on Environmental Systems, AIAA 2012-3567 (15-19 July 2012) San Diego, CA.
17. López F.A., Centeno T.A., Rodriguez O. & Alguacil F.J. (2013): Preparation and characterization of activated carbon from the char produced in the thermolysis of granulated scrap tyres, Journal of the Air & Waste Management Association, 63:5, 534-544.

## Paper material recovery in the ELV multi-material components recycling as a stage of the circular economy implementation

*The waste management regulations and the schedule to introduction the Circular Economy in the European Union awake the requirement to fill gaps in the of ELV waste management methods. Particular efforts must be made to improve the treatment methods of waste of the multi-material parts, which are increasingly applied in the vehicle construction. Existing methods of these wastes treatment are inefficient. Incineration in cement kilns and power stations threaten the environment and health. It is also a source of an additional stream of waste. Low-temperature thermolysis of the multi-material waste seems to be an appropriate solution. The products of the process are alternative energy materials, as well as most of the metal components and inorganic is recovered. It is noted a rapid growth of multi-material parts and componets in the vehicle design, therefore the effective methods of large-scale management of this waste should be promptly implemented.*

Autorzy:

mgr inż. **Adam Doliński** – Instytut Mechaniki Precyzyjnej  
dr hab. inż. **Andrzej Wojciechowski** – Instytut Mechaniki Precyzyjnej  
dr hab. inż. **Krystyna Pietrzak** – Instytut Mechaniki Precyzyjnej  
mgr inż. **Katarzyna Dolińska** – Bioodpady.pl Sp. z o.o.  
mgr inż. **Wołosiak Marta** – WGW Greek Energy Sp. z o.o.