

# Odzysk energetyczny materiałów odpadowych z tworzyw sztucznych

Antoni Roland MIGDAŁ\* - Instytut Chemii Przemysłowej im. prof. Ignacego Mościckiego, Warszawa; Jacek KIJENSKI - Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, Politechnika Warszawska, Filia Płock; Andrzej KAWALEC - Instytut Chemii Przemysłowej im. prof. Ignacego Mościckiego, Warszawa; Andrzej KĘDZIORA - Weyer Group, Weyer Polska Sp. z o.o., Puławy; Paweł REJEWSKI, Ewa ŚMIGIERA - Instytut Chemii Przemysłowej im. prof. Ignacego Mościckiego, Warszawa

Prosimy cytować jako: CHEMIK 2014, 68, 12, 1056-1073

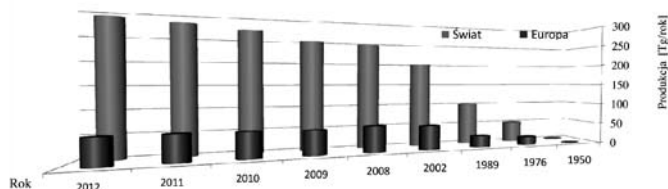
## Tworzywa sztuczne

Tworzywa sztuczne, to grupa materiałów zawierająca w swojej strukturze związek wielkocząsteczkowy jako element dominujący. Pozostałymi składowymi tworzywa są zazwyczaj dodatki modyfikujące właściwości finalnego materiału, tj. barwniki, stabilizatory, uniepalniacze, środki spieniające czy napelniacze. Współcześnie znanych jest kilkadziesiąt grup tworzyw, jednak do kategorii tworzyw wielkotonazowych (produkowanych masowo) zaliczają się: polietylen (PE) czasami różnicowany na materiał o niskiej gęstości (LDPE) i wysokiej gęstości (HDPE), polipropylen (PP), polichlorek winylu (PVC), polistyren (PS) oraz politereftalan etylenu (PET). Wszystkie one należą do grupy termoplastów. Udział pozostałych materiałów polimerowych nie przekracza 20 %mas. [1,2].

Historycznie, pierwszym wytwarzanym masowo tworzywem sztucznym był bakelit – tworzywo termoutwardzalne [3], a pierwszym produkowanym przemysłowo termoplastem był polichlorek winylu. W 1950 r. wyprodukowano 1,7 mln ton polimerów bazowych.

Dynamiczny wzrost produkcji tworzyw sztucznych nastąpił dopiero w drugiej połowie XX wieku (Rys. 1), kiedy to zaimplementowano do praktyki przemysłowej wiele przełomowych odkryć w syntezie i przetwórstwie samych polimerów, w tym wdrożenie metaloorganicznych katalizatorów Zieglera i Natty do produkcji poliolefin dużej gęstości, wytwarzanie folii, stosowanie uniepalniaczy do polistyrenu [4÷7]. W 2012 r. produkcja tworzyw polimerowych osiągnęła blisko 288 mln ton, a średni wzrost światowej produkcji w ciągu ostatnich 60-ciu lat wyniósł 4,6%/rok (Rys. 1).

Od wielu lat niekwestionowanym liderem w produkcji tworzyw sztucznych są wytwórnie zlokalizowane w krajach azjatyckich [8÷10]. W regionie tym w 2012 r. wytworzono prawie 44,6 %mas. światowej produkcji tworzyw polimerowych, w tym 23,9 %mas. w Chinach. Drugie miejsce zajmują *ex aequo* producenci europejscy i wytwórcy z krajów Ameryki Północnej, z udziałami w rynku odpowiednio 20,4% i 20 %mas. [11,12].



Rys. 1. Produkcja tworzyw sztucznych na przestrzeni ostatnich kilkadziesiąt lat [11,12,18]

Współcześnie produkowane tworzywa, czy kompozyty polimerowe, konkurują wytrzymałością i funkcjonalnością z materiałami

Autor do korespondencji:  
Dr inż. Antoni R. MIGDAŁ, e-mail: antoni.migdal@ichp.pl

tj. drewno, metal, szkło, ceramika, skóra, papier, skutecznie wypierając te drugie z powszechnego użytku. Rynek tworzyw rozwija się bardzo dynamicznie w odniesieniu do wskazanych referencyjnych działów przemysłu. Stwierdzenie takie znajduje odzwierciedlenie w danych statystycznych dotyczących produkcji tworzyw sztucznych w odniesieniu do produkcji stali, aluminium czy papieru. W 1975 r. produkcja syntetycznych polimerów stanowiła c.a. 4-krotność tonażu produkcji aluminium, 7,75% stali surowej czy 28,6% papieru (w tym tektury). Trzydzieści siedem lat później roczna produkcja tworzyw stanowiła 6-krotność produkcji aluminium, 18,5% rocznej produkcji stali surowej, czy 72% w przeliczeniu na produkcję papieru [11,13÷18].

## Struktura rynku tworzyw sztucznych

Implementację tworzyw w poszczególnych działach rynku na przestrzeni ostatnich kilku lat ujęto w Tablicy 1. Przedstawione tam dane wskazują na stabilność w czasie i dominację dwóch rynków zbytu tworzyw sztucznych. W aplikacji tworzyw prym wiedzie rynek materiałów opakowaniowych, z ponad 39 %mas. udziałem w wolumenie tworzyw obecnych na europejskim rynku. Do kategorii opakowaniowej należą m.in. wyroby powszechnego użytku, tj. reklamówki, folie, tacki do pakowania i przechowywania żywności, naczynia termiczne czy kubki i butelki do napojów. Udział poszczególnych tworzyw w rynku opakowań przedstawia zależność: PE>PP>PET>>PS>PVC.

W strumieniu przetwarzanym na opakowania dominują tworzywa termoplastyczne: poliolefiny i poliestry. Analizując ten strumień surowcowy warto mieć na uwadze, że – ze względu na dość krótki cykl życia – jest to właściwie strumień odpadu (18 mln ton/rok w skali Europy).

Składające się na niego polimery charakteryzują się stabilnością struktury w czasie, często wielokrotnie przekraczającą zaprogramowany czas życia wyrobu wytworzonego z ich udziałem (wysoka odporność oksydacyjna w warunkach środowiska naturalnego). Cecha ta, będąca zaletą w okresie eksploatacji, staje się uciążliwym mankamentem w momencie zakończenia pierwotnie zaprogramowanego cyklu życia i przekwalifikowania materiału na odpad polimerowy. Stosowanie dodatków przyspieszających rozkład tworzyw poliolefinowych, to działania doraźnie i niejednokrotnie wewnętrznie sprzeczne. Należy mieć świadomość, że przyspieszona degradacja, to nie tylko pożądana cecha towaru użytkowego (utyliczacja), ale również zagrożenie w okresie użytkowania.

Dodatki skutecznie inicjującymi biodegradację tworzyw są np. endospory niektórych szczepów bakterii czy grzybów, jednak tworzywa sztuczne z takimi dodatkami nie są akceptowane społecznie.

Współcześnie stosowane komponenty przyczyniają się do rozkładu materiału w warunkach kompostowania (biodegradacja napelniacza, dodatku) i ułatwienia procesów oksydacyjnych (zmiana zwilżalności, obecność enzymów wspomagających destrukcję mikrobiologiczną), ale samoistnie nie przyspieszają znacząco degradacji oksydacyjnej samego tworzywa [19,20].

Tablica 1

**Udział poszczególnych segmentów rynku w implementacji tworzyw sztucznych w okresie ostatniej dekady [1,11,78]**

Segment rynku	Przetwórstwo tworzyw dla potrzeb poszczególnych sektorów w danym roku – Europa, %						USA, %	Kanada, %
	2003	2005	2007	2009	2011	2012	2000	2003
Opakowania	37,2	37	37	40,1	39,4	39,4	27,5	34
Budownictwo	18,5	21	21	20,4	20,5	20,3	24,2	26
Motoryzacja	8	8	8	7	8,3	8,2	5,5	18
Elektronika	8,5	7	6	5,6	5,4	5,5	4,5	5
Pozostałe	27,8	27	28	26,9	26,4	26,6	38,3	17

Kolejnym znaczącym odbiorcą materiałów z tworzyw sztucznych jest budownictwo. Rynek ten zużywa ok. 20% wolumenu tworzyw wytwarzanych w EU.

Do kategorii tej należą m.in. wyroby powszechnego użytku tj. osłony, rynny i systemy drenażowe, folie ochronne, taśmy, papy i okładziny, siding, geomembrany, stolarka okienna, powłoki i materiały termoizolacyjne (w tym spieniany PS czy poliuretan (PUR)), czy nawet zbrojenie betonów. Udział poszczególnych tworzyw w budownictwie przedstawia szereg: PVC>HDPE>PS>PP≈PUR. W tej kategorii dominują tworzywa termoplastyczne na bazie PVC.

Materiały dla budownictwa charakteryzują się dłuższym czasem życia niż materiały opakowaniowe (wycofanie z eksploatacji w dłuższej perspektywie czasowej), jednak, ze względu na zbliżoną strukturę i odporność na degradację mikrobiologiczną, posiadają podobne ograniczenia jako odpad – wiązania w strukturze polimeru pozostają stabilnie dłużej niż czas eksploatacji finalnego produktu z ich udziałem.

W tym aspekcie ważna jest odpowiedzialność producentów materiałów i wyrobów z tworzyw sztucznych dla budownictwa, za poprawne zaprojektowanie nie tylko cyklu życia produktu, ale również sposobu odzysku czy zagospodarowania tworzywa gdy stanie się ono odpadem.

Pozostała część rynku tworzyw charakteryzuje się znacznym rozdrobnieniem; wytwarzane są tworzywa dla potrzeb motoryzacji ~7 %mas., sprzętu elektronicznego i elektrycznego ~5,6 %mas. Dekoncentracja tych segmentów uniemożliwia bardziej szczegółową analizę danych.

Z przedstawionego opisu wylania się obraz udziału poszczególnych gatunków w ogólnoeuropejskim i globalnym wolumenie tworzyw sztucznych. Szczegółowe zestawienie przedstawiono w Tablicy 2. Skokowa zmiana danych, występująca pomiędzy rokiem 2004 i 2005, związana jest z rozszerzeniem Unii Europejskiej i objęciem analizą nowych krajów. Redukcja produkcji tworzyw w 2008 r. jest reperkusją kryzysu gospodarczego rynków finansowych i bankowych, złagodzoną rozszerzeniem się rynków nowych członków Unii. Zmiany te nie mają wpływu na strukturę rynku – jakościowy udział poszczególnych kategorii materiałowych. Dominującymi tworzywami sztuczными na rynku EU są termoplasty. Porównawczo, w 2004 r. globalna produkcja tworzyw w ujęciu jakościowym przedstawiała się następująco: PE – 31%, PP – 19%, PVC – 17%, PS – 8%, PET – 7%, PUR – 6%, pozostałe – 12 %mas. Udziały głównych termoplastów na rynku NAFTA są następujące: PE – 39%, PP – 15%, PVC – 17%, PS – 11%, PET – 5 %mas. W przypadku rynku europejskiego zachowana została hierarchia pomiędzy rynkami poszczególnych tworzyw masowego stosowania (główni udziałowcy rynku), przy nieznacznych zmianach ilościowych tworzyw. Odnosząc te dane do ujętych w Tablicy 2 można stwierdzić, że rynek europejski pomimo, że jest wrażliwy na kryzysy gospodarcze, to dobrze odzwierciedla światowe

we trendy w produkcji poszczególnych grup tworzyw sztucznych. Główni ich reprezentanci, to tworzywa poliolefinowe – PE i PP, których produkcja zaspokaja prawie 50% całego popytu na tworzywa sztuczne. Kolejnymi, co do wielkości wolumenu zużycia, polimerami są: PVC z 11% udziałem oraz PS i PET z udziałami po c.a 7%. Materiały te, razem z pozostałymi wcześniej wymienionymi PE i PP, tworzą grupę termoplastów, obejmującą 3/4 całego zapotrzebowania na tworzywa i stanowią trzon polimerów masowego stosowania. Rokrocznie do obrotu w EU wprowadzane jest ponad 37 mln ton termoplastów, z czego c.a. 20 mln ton stanowią materiały opakowaniowe (głównie poliolefiny, PS i PET), które zostaną zakwalifikowane jako odpad w ciągu jednego roku. Pozostałe ~17 mln ton stanowią tworzywa o wydłużonym czasie użytkowania (głównie PVC i częściowo PS), które w dalszej perspektywie czasowej zaistnieją jako odpady. W skali globu odpady z rynku opakowaniowego stanowią co najmniej 115 mln ton/rok. Odpady takie są cenne ze względu na niski stopień degradacji szkieletu węglowego. Wysokie wymagania stawiane współczesnym tworzywom, nierzadko wymuszają stosowanie domieszek materiałów obcych już na etapie produkcji, czy też podczas przetwórstwa, albo tworzenie materiałów wielowarstwowych, np. wtapianie etykiety PP na butelki PET na etapie konfekcjonowania finalnego wyrobu. Działanie takie, rozpatrywane z punktu widzenia odpadu, jest zanieczyszczeniem tworzywa sztucznego, nieeliminującym energii wiązania w strukturze polimeru.

W artykule prezentowane będzie podejście związane zagospodarowaniem odpadów z tworzyw polimerowych w kontekście energii zmagazynowanej w wiązaniach C–C i C–H.

Tablica 2

**Struktura popytu i podaży tworzyw sztucznych na rynku lokalnym i globalnym w ostatniej dekadzie [11,79,80]**

Tworzywo	Popyt na wybrane grupy tworzyw, %									
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Rynek europejski	PE	29,0	29,3	29,5	29	29	28	29	29	29,5
	PP	18,4	18,7	18,6	19	18	18	19	19	18,8
	PS	6,0	5,8	5,6	7	8	8	8	8	7,5
	PVC	15,9	15,4	15,0	13	12	12	11	12	11
	PET	4,8	4,9	5,2	7	7	7	8	6	6,5
	PUR	b.d.	b.d.	b.d.	6	7	7	7	7	7
Popyt w EU <sup>(*)</sup> , mln ton	31,0	42,9	47,5	49,5	52,5	48,5	45	46,4	47	
Produkcja EU <sup>(*)</sup> , mln ton	31,6	32,5	57,5	60	65	60	55	57	58	
Produkcja świat, mln ton	200	225	230	265	260	245	250	270	288	

(\*) obejmuje kraje zrzeszone i stowarzyszone gospodarczo z UE w danym roku

**Analiza energetyczna cyklu życia tworzyw**

Początkowo dwa główne surowce do produkcji bakelitu: formaldehyd i fenol, otrzymywano w wyniku suchej destylacji drewna i smoły węglowej [21,22]. Współcześnie półprodukty w produkcji tworzyw pozyskiwane są głównie w wyniku przerobu paliw płynnych – ropy naftowej i gazu ziemnego.

Do wyliczenia energochłonności poszczególnych procesów i operacji jednostkowych związanych z ich wydzieleniem konieczna jest znajomość dominujących metod produkcji danego tworzywa. Technologie są ciągle modyfikowane, dopasowywane do surowców i nośników energii dostępnych w danej lokalizacji.

Różnice w rozwiązaniach konstrukcyjnych instalacji działających w różnych lokalizacjach w ramach tej samej technologii, mają wpływ na zmianę energochłonności procesów i mogą utrudniać analizę porównawczą danych. Istnieją też znaczące odstępstwa wynikające z niskich cen pozyskania surowców z lokalnych złóż. W raportach dotyczących technologii produkcji tworzyw, do początku ubiegłej dekady frakcje benzynowe i naftowe wskazywano jako główny wsad do produkcji olefin. W ubiegłej dekadzie w krajach Ameryki Północnej, wraz z rozwojem technologii eksploatacji metanu i ropy ze skał łupkowych, dokonana się transformacja surowcowa na rzecz LPG i  $CH_4$  [23 ÷ 26]. Obecnie cena metanu w USA kształtuje się na poziomie 145–175 USD/1000Nm<sup>3</sup> i jest o 30–50% niższa od ceny surowca oferowanego w Europie [27,28]. Dostęp do tańszego paliwa ma znaczenie dla ekonomii procesów energochłonnych czy wodorowych, np. piroliza, kraking parowy, hydrokraking. Swoistym ewenementem są też zlokalizowane w Chinach wytwórnie tworzyw, korzystające z dobrodziejstwa płytko położonych złóż węgla. W 2006 r. w tym kraju działało 79 instalacji wytwarzających PVC z węgla metodą acetylenową. Łącznie wyprodukowano w nich 4,8 mln ton PVC, co stanowiło 68% rocznej produkcji w tym kraju. Podstawą działania tych instalacji są niskie ceny węgla, oraz niestosowanie podatków od emisji ditlenku węgla. Cena węgla wydobywanego metodą odkrywkową w rejonie Nei Mongol kształtuje się na poziomie 11,7–16,7 USD/tonę, a energii uzyskanej z niego: 20–25 USD/MWh. W takich realiach ekonomicznych produkcja PVC z węgla jest bardziej opłacalna niż produkcja z ropy, pomimo, że proces oparty na acetylenie z karbidu (węglika wapnia) jest bardziej energochłonny niż np. technologie wykorzystujące etylen i jest źródłem potencjalnej emisji do środowiska związków rtęci – katalizatorem jest  $HgCl_2$ . Proces bazujący na acetylenie jest znacznie lepiej rozpoznany i charakteryzuje się prostotą w sterowaniu i obsłudze. W 2012 r. smoła węglowa była źródłem 27% całego tonażu benzenu zużytego przez chiński przemysł chemiczny m.in. do produkcji PS [29,30]. Opisane przykłady zmian w technologiach produkcyjnych mogą być źródłem rozbieżności i odstępstw w wynikach analiz energetycznych kosztów pozyskiwania i przetwarzania surowca do produkcji tworzywa.

W dyskusji nad energetycznymi aspektami produkcji tworzyw oparto się na danych literaturowych. Autorzy poprzedzali modelowanie działaniami optymalizującymi procesy przerobu bazy surowcowej do produkcji danego rodzaju tworzywa. Rozpatrując aspekty energetyczne produkcji tworzyw skupiono się na danych dla wielkiej piątki – tworzyw wielkotonażowych: PE, PP, PS, PVC, PET. Dane energetyczne pozyskane z literatury podzielono na dwa zbiory (A i B) różniące się podstawą obliczeń. Szerszy ze zbiorów (A) obejmował nakłady ponoszone na pozyskanie tworzywa od momentu identyfikacji złoża surowca. W tej kategorii zawierała się energia związana z identyfikacją i przygotowaniem złoża do eksploatacji, wydobywaniem, magazynowaniem i transportem surowca do zakładu przetwórczego (tankowiec, rurociąg, przeladunek), oczyszczaniem, uszlachetnianiem, szeroko rozumianą reorganizacją struktury surowca (procesy petrochemiczne np. piroliza, kraking, reakcja, polimeryzacja), komponowanie i formowanie tworzywa (np. granulacja) do standardów rynkowych [31,32]. Drugi rodzaj analiz (B) rozpatrywał aspekty energetyczne począwszy od etapu reorganizacji struktury półproduktu do etapu formowania. Część z danych energetycznych była określana metodą współczynników poprzez analogię do innych już dobrze opisanych procesów [33]. W niektórych analizach stosowano algorytmy uwzględniające koszty środowiskowe [34]. Algorytmu tego nie stosowano np. w krajach, które nie ratyfikowały protokołu z Kioto, lub opracowania powstały w okresie przedakcesyjnym [31,35]. W zestawieniu nie ujęto danych dla technologii bazujących wyłącznie na węglu (Chiny). Pozyskane dane przedstawiono w Tabelcy 3.

Tabcica 3

**Energochłonność produkcji wybranych tworzyw sztucznych**  
[4 ÷ 6,8,23,25,31,38,49]

Tworzywo	Przyjęte w algorytmach zużycie surowca kg/kg tworzywa	Energochłonność procesu: MJ/kg tworzywa		Wartość opałowa tworzywa, MJ/kg
		produkcja	w tym z frakcji ropy	
PE	1,06–1,33	60–70	51–55	43
PP	1,12–1,41	65–73	52–58	44
PS	1,06–1,52	45–80	31–55	40
PVC	0,48–1,01	53–75	24–34	18
PET	0,59–1,62	80–84	30–31	34

Z zestawienia przedstawionego w Tabelcy 2 jednoznacznie wynika dominacja wytwórni olefin jako podstawowej instalacji wytwarzającej półprodukty w syntezie polimerów. Etylen ( $C_2^=$ ) czy propylen ( $C_3^=$ ) wykorzystywane są w technologiach produkcji każdego z masowych tworzyw. Olefiny są wykorzystywane bezpośrednio do polimeryzacji, wraz z dichloroetanem do produkcji chlorku winylu (tworzywo PVC), wspólnie z benzenem do produkcji etylobenzenu i dalej styrenu (tworzywo PS), czy jako tlenek etylenu lub glikol etylenowy wraz z kwasem tereftalowym via ksylen do produkcji PET. Alkeny te otrzymywane są w instalacjach pirolizy olefinowej, pirolizy eteru dimetylowego (procesy MTO, MTP), krakingu parowego, termicznego czy fluidalnego krakingu katalitycznego, uzupełnionych w dalszej perspektywie o jednostki metatezy zwiększające uzysk propylenu kosztem etylenu [37 ÷ 41]. Działające w Ameryce, Europie i Azji wytwórnie tworzyw masowego stosowania posiadają w swojej strukturze wytwórnie olefin [38]. W 2010 r. w USA do produkcji tworzyw sztucznych zużyto energii ~22,4 MJ/kg surowca (22,6 MJ/kg – po przeliczeniu na energię paliw pierwotnych przy sprawności elektrowni ~33%) – frakcji rafineryjnej  $C_2-C_5$  o dominującym udziale propanu i butanu, przy czym 0,6% tej wartości stanowiła energia elektryczna wykorzystywana głównie do obsługi procesów (1,7% w przeliczeniu na energię paliw pierwotnych), ~1% stanowiła energia cieplna powstała ze spalania odpadowych strumieni. Pozostała energia używana w procesie technologicznym to ciepło, które zostało wytworzone w wyniku spalania dodatkowego paliwa – gazu ziemnego [36].

Procesy związane z wydobywaniem surowca i procesy rafineryjne (wydzielenie frakcji półproduktu do instalacji olefin) absorbują maksymalnie do 20% całkowitej energii używanej do produkcji tworzywa. Pozostała część energii jest konsumowana stratnie podczas reorganizacji struktury węglowodoru do monomeru, polimeryzacji i standaryzacji (granulacja).

Wysoki (ponad 97%) udział energii cieplnej w całości energii konsumowanej podczas wytwarzania tworzyw sztucznych pozwala na proste odniesienie wartości energii użytej na przetwórstwo do wartości opałowej surowca, czy samego tworzywa. Frakcje węglowodorowe wykorzystywane jako surowiec do produkcji olefin charakteryzują się wartością opałową wynoszącą 42–46 MJ/kg (średnio 44 MJ/kg), porównywalną z wartością opałową ropy naftowej 44 MJ/kg, z której są one otrzymywane. Przedstawione w Tabelcy 3 wyniki wskazują bezspornie, że wytwarzanie tworzyw sztucznych jest procesem energochłonnym, a ilość energii dostarczonej do procesu w przypadku każdego z tworzyw znacznie przekracza wartość opałową finalnego tworzywa (energia dostarczana do jego wytworzenia nie jest kumulowana w produkcie i jest nie do odzyskania). Różnicowanie procesów wytwarzania poszczególnych tworzyw w funkcji ilorazu wartości opałowej produktu i energochłonności procesu pozwala na utworzenie szeregu pod względem stopnia od-

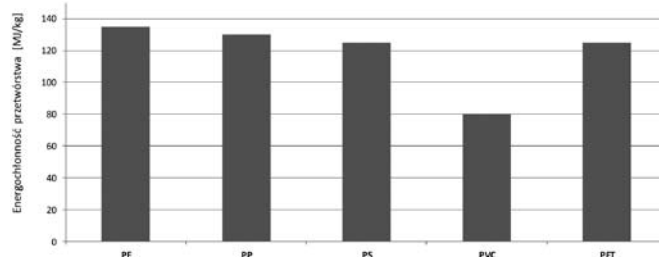
zysku energii włożonej w ich wytworzenie. Dane zawarte w Tabeli 3, (po uśrednieniu) wskazują na szereg: PE > PP ≈ PS > PET > PVC. Przy założeniu, że w każdym przypadku surowiec był ten sam – ropa naftowa (wyjątkiem jest PVC, gdzie do budowy cząsteczki monomeru dodatkowo wykorzystywany jest również chlor) największy potencjał odzysku energii włożonej do procesu posiada PP. Wartości uzyskane dla PP i PS są porównywalne. Najmniejszym stopniem odzysku charakteryzuje się produkt polimeryzacji chlorku winylu.

Parametry energochłonności produkcji poszczególnych tworzyw sztucznych warto odnieść do energochłonności produkcji wybranych materiałów konstrukcyjnych: aluminium i stali, z którymi tworzywa współcześnie podejmują konkurencję.

Energochłonność produkcji aluminium w USA w 2008 r. wyniosła ~128 MJ/kg, przy czym w procesie wytwarzania aluminium prawie 45% energii stanowiła energia elektryczna [42]. W tym samym okresie energochłonność produkcji stali wyniosła c.a. 16,5 MJ/kg, w tym 16% to konsumpcja energii elektrycznej [43,44]. Po przeliczeniu na pierwotne źródła energii (sprawność elektrowni c.a. 33%) wartości te kształtują się następująco: aluminium – 242 MJ/kg, stal – 24,6 MJ/kg. Wartość opałowa glinu (Al), to 31 MJ/kg; dla stali o 1% zawartości węgla wynosi ona ~7 MJ/kg. W przypadku każdego z omawianych tworzyw sztucznych energochłonność procesu wytwórczego przyjmuje wartości pośrednie i zawiera się w przedziale wyznaczonym przez obydwa metale. Stwarza to szanse do dalszego rozwoju rynku tworzyw i wypierania z rynku metali o wysokim stopniu energochłonności produkcji, wskazuje jednocześnie na dystans, jaki dzieli tworzywa od stali – w wielu dziedzinach jeszcze niezastąpionego materiału konstrukcyjnego.

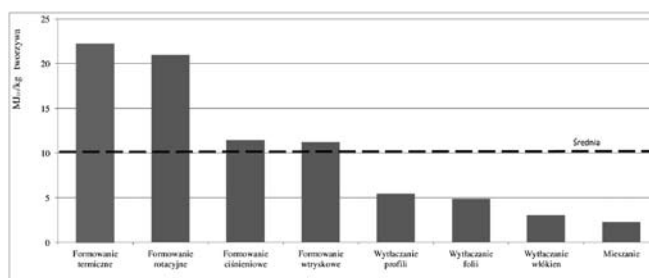
Tworzywa sztuczne to nie tylko produkcja, ale również przetwórstwo do wyrobu finalnego, rynkowego. Z danych przedstawionych w raporcie Departamentu Zasobów Naturalnych Kanady wynika, że w wyniku przetwórstwa tworzywa sztuczne podwajają swoją wartość rynkową [45]. Energochłonność procesów przetwórczych była przedmiotem badań m.in. grupy T.G. Gutowskiego i M. Garetti [46]. Większość procesów przetwórczych obejmuje operacje jednostkowe tj. mieszanie, ogrzewanie, chłodzenie, sprężanie, rozprężanie, mielenie, formowanie (stapianie, zgrzewanie). Popularnym procesem wykorzystywanym w przetwórstwie termoplastycznych tworzyw sztucznych jest formowanie wtryskowe. Proces ten dzieli się na etapy: mechaniczne mocowanie formy, rozgrzanie granulatu do temperatury procesu, wtrysk do formy i stabilizacja w komorze, rozdmuch ciśnieniowy, otwarcie formy i ciśnieniowy wyrzut wyłoczeki. Część z tych operacji jest energetycznie przeciwstawna (grzanie vs chłodzenie, mielenie vs stapianie), co podnosi energochłonność całego procesu. Energochłonność przetwórstwa zależy od wielu czynników, w tym również od rodzaju stosowanego tworzywa. Szacunkowe dane dotyczące energochłonności przetwórstwa różnych gatunków tworzyw w Australii w 1990 r. przedstawiono na Rysunku 2. Analizowana kategoria obejmowała nakłady energetyczne związane z transportem granulatu, mieleniem, tworzeniem przedmieszek i mieszanek, nadawaniem wyrobowi ostatecznego kształtu (wytlaczanie, wtrysk, prasowanie, rozdmuch, wyciąganie, itp.) oraz transport do zakładu konfekcjonującego. Średnia energochłonność przetwórstwa w tym czasie, uwzględniająca udziały poszczególnych tworzyw w rynku wyniosła 121 MJ/kg. Na tej podstawie materiały uszeregowano według malejącej energochłonności przetwórstwa (najbardziej energochłonne): PE > PP > PS ≈ PET >> PVC. Z zestawienia wynika, że najbardziej energochłonne jest przetwórstwo tworzyw olefinowych, a najmniej energii pochłania przetwórstwo PVC. Przy porównywaniu energochłonności produkcji i przetwórstwa należy mieć na uwadze, że do produkcji tworzyw wykorzystywane jest ciepło spalania paliw, podczas gdy instalacje przetwórstwa tworzyw są zasilane wyłącznie energią elektryczną lub w połączeniu z zasilaniem w paliwo płynne. Autorzy opracowania nie podają czy prezentowane wartości są wyrażone w energii nośników pierwotnych, czy jedynie sumą poszczególnych składowych zarówno

elektrycznych jak i ciepłych energii. Pomimo wskazanych ograniczeń w interpretacji wyników, można stwierdzić, że przetwórstwo tworzyw było w tamtym czasie bardziej energochłonne niż ich produkcja (średnia wartość energochłonności tak zdefiniowanego przetwórstwa jest dwukrotnie większa od średniej energochłonności produkcji termoplastycznych tworzyw sztucznych – 67 MJ/kg). Postęp technologiczny, czynniki ekonomiczne (ceny energii), nacisk społeczny i ochrona środowiska (redukcja emisji) umożliwiły znaczne podniesienie bezpieczeństwa pracy i ograniczenie konsumpcji energii działających instalacji przetwórczych. Średnie zużycie energii w 2006 r. w instalacji przetwarzającej tworzywa sztuczne wyniosło już 10,3 MJ energii (głównie elektrycznej) w przeliczeniu na kilogram produktu [1].



**Rys. 2. Energochłonność przetwórstwa tworzyw sztucznych w Australii w 1990 r. [31]**

Energochłonność przetwórstwa zależy nie tylko od rodzaju materiału, ale i od zastosowanej metody, czy od kształtu, rozmiaru produktu. Na Rysunku 3 przedstawiono energochłonność wybranych instalacji przetwórstwa. Najbardziej energochłonne są instalacje termoformowania próżniowego (operacje przeciwstawne energetyczne: grzanie vs chłodzenie, próżnia vs ciśnienie) zużywające średnio 22,6 MJ/kg. Średnim poziomem energochłonności charakteryzuje się np. proces formowania wtryskowego (11,2 MJ/kg). W tego typu instalacjach maszyny do przetwórstwa zużywają 59% całej energii elektrycznej, 21% wykorzystywane jest do ogrzewania, wentylacji, klimatyzacji i oświetlenia hali, 9% konsumują agregaty chłodnicze. Mniej energochłonne są instalacje do wytłaczania profili, folii, czy włókien (3–5 MJ/kg). Instalacje do stapiania i mieszania termoplastów uważane są za najmniej energochłonne (<2,5 MJ/kg) [47,48].



**Rys. 3. Konsumpcja energii elektrycznej MJ(e) w wybranych instalacjach przetwórstwa tworzyw sztucznych (wartości podano w przeliczeniu na kg tworzywa) w 2006 r. [77]**

Szacowana współcześnie sumaryczna energochłonność wszystkich etapów przetwórstwa PET do opakowań, z uwzględnieniem transportu i kosztów środowiskowych wynosi c.a. 20 MJ/kg energii (na podstawie ankiet przetwórców tworzyw sztucznych) [49]. Wartość ta uważana jest również za referencyjną dla całego współczesnego sektora przetwórstwa tworzyw sztucznych [50÷52]. Wartość tę trudno odnieść do energochłonności procesu produkcyjnego (nie jest znany udział energii elektrycznej w produkcji) i nie można dokonać poprawnego przeliczenia na pierwotne źródła energii. Można jednak próbować oszacować tę wartość. Przy hipotetycznym założeniu, że energia potrzebna do uformowania produktu będzie równoważna wartości formowania wtryskowego (preforma) i rozdmuchowego (finalna butelka) [53], to 60–80%

energii przetwórstwa będzie stanowiła energia elektryczna. Przy takim założeniu energochłonność przetwórstwa PET będzie zawierać się w przedziale 44,3–52,4 MJ/kg w przeliczeniu na pierwotne źródła energii. Wartość ta stanowi średnio 64% energochłonności procesu produkcyjnego tego tworzywa (Tab. 2). Sumaryczna energochłonność produkcji PET i jego przetwórstwa do opakowań wyniesie c.a. 134,5 MJ/kg w energii pierwotnych źródeł energii, czyli prawie czterokrotność wartości opałowej tworzywa.

Podsumowując, produkcja wyrobów z PET należy do procesów o umiarkowanej energochłonności. Zakładając stałość w czasie szeregu energochłonności przetwórstwa tworzyw masowego stosowania (Tab. 3), można przyjąć, że przetwórstwo tworzyw, tj. PE, PP czy PS będzie również pochłaniało ponad 100 MJ/kg.

## Recykling

W przypadku większości tworzyw masowego stosowania nakłady energetyczne ponoszone łącznie na reorganizację struktury materiału (produkcja tworzyw) i w procesach formowania finalnego produktu z tworzywa (przetwórstwo) przekraczają poziom 100 MJ/kg produktu. Wartość taka kwalifikuje wyroby z tworzyw sztucznych do grupy produktów o średniej energochłonności produkcji [46].

Przy stopniu obciążenia środowiska emisją CO<sub>2</sub>, jaką generują tworzywa polimerowe należy podejmować działania ukierunkowane na zmniejszanie zapotrzebowania na te materiały. Logicznie jest dążenie do maksymalnego wydłużenia czasu życia finalnego produktu (wydłużenie czasu eksploatacji) lub zwiększenie cykli życia „długowiecznego” tworzywa.

Przykładem działania ograniczającego zapotrzebowanie na PET jest zastosowanie butelek PET o cieńszej ścianie, zakrętek o zmiennej konstrukcji (eliminacja dodatkowego pierścienia) przy zachowaniu pozostałych parametrów użytkowych na akceptowalnym poziomie. W branży budowlanej stosuje się „odchudzoną” stolarkę okienną wykonaną z PVC [54]. Przemysł opakowaniowy (~40% wolumenu produkowanych tworzyw sztucznych) wykorzystuje w niewielkim stopniu potencjał użytego tworzywa sztucznego i na dodatek w sposób krótkotrwały – w nieodległej perspektywie czasowej produkt staje się odpadem pokonsumenckim. W przypadku tworzyw wykorzystywanych w budownictwie, czas użytkowania jest dłuższy; moment, w którym produkt staje się odpadem jest odroczony w czasie.

Tworzywo sztuczne u schyłku swego cyklu życia wciąż niejednokrotnie stanowi wartościowy produkt (niezdegradowany szkielet polimerowy), zdyskwalifikowany z powodu utraty jednej z zadanych cech użytkowych. Rekomendacją do zastosowania konkretnego kierunku zagospodarowania takiego odpadu mogą być np. parametry energochłonności procesów produkcji, przetwórstwa i recyklingu tworzywa. Dla grupy „nie w pełni wyeksploatowanych strukturalnie” odpadów pokonsumenckich, czy odpadów budowlanych, jako pierwszy wskazany jest recykling materiałowy zachowujący energię włożoną w reorganizacji struktury tworzywa. Proces ten będzie rekomendowany w sytuacji, gdy łączne nakłady energetyczne operacji związanych z odzyskiem tworzywa z odpadu i jego standaryzacją nie przekroczą energochłonności procesu przetwórczego lub nie wystąpią inne czynniki dyskwalifikujące materiał z dalszej eksploatacji, takie jak zesterzenie chemiczne (korozja oksydacyjna), zanieczyszczenie niepożądanym materiałem, pigmentem itp. Strumień kierowany do instalacji recyklingu materiałowego powinien zawierać wyselekcjonowany rodzaj tworzywa sztucznego o wysokim stopniu czystości i jednorodności chemicznej. Recykling materiałowy, jak każda forma przetwórstwa, wiąże się z nakładami energetycznymi podstawowych operacji, tj. rozdrabnianie, czyszczenie, mycie suszenie (czasami dodatkowym etapem jest sterylizacja radiacyjna) Produktem wyjściowym są standaryzowane regranulaty danego tworzywa sztucznego [55]. Tworzywo może być poddane recyklingowi materiałowemu ograniczoną liczbą razy, za każdym razem z przeznaczeniem do produkcji materiału o niższej klasie jakościowej,

standardzie. Problematiczne dla recyklingu materiałowego tworzyw jest określenie, w którym cyklu odbiegu aktualnie znajduje się tworzywo. W sytuacji wystąpienia ograniczeń uniemożliwiających ponowne bezpośrednie zawrócenie materiału do przetwórstwa wskazany jest recykling surowcowy (np. depolimeryzacja do monomeru lub kraking czy piroliza do frakcji organicznych z przeznaczeniem do innych procesów technologicznych). Recykling surowcowy bywa również zwany chemicznym. Przykładowo, odpad poliolefinowy pochodzący ze strumienia odpadów komunalnych (zanieczyszczenia innymi substancjami), czy opakowania wielowarstwowe albo wielomateriałowe (butelka PET z nadrukiem, wtopioną etykietą z innego tworzywa) nie są poddawane recyklingowi materiałowemu (nakłady frakcjonowania, wydzielenia jednorodnej grupy materiałowej przewyższają wartość recyklatu). Odpady te są przetwarzane metodami recyklingu surowcowego lub energetycznego. Podobnie w przypadku odpadów spienianego PS – materiału o bardzo małej gęstości – koszty związane z odzyskiem materiałowym (oczyszczanie) są większe niż wartość recyklatu [56].

Rozpatrując energetyczne aspekty recyklingu surowcowego odpadów z tworzyw sztucznych warto pamiętać, że pozyskanie i standaryzacja surowca (ropy naftowej) do frakcji węglowodorowej stanowi jedynie 20% całkowitych nakładów energetycznych ponoszonych na produkcję tworzywa.

Recykling surowcowy bywa również zwany chemicznym. Związane jest to m.in. z możliwością zastosowania otrzymanych surowców jako półproduktów do innych syntez.

Materiały, dla których nakłady energetyczne recyklingu surowcowego, przekraczają 80% energochłonności produkcji tworzywa lub równoważność wartości opałowej samego tworzywa, posiadają również cenną ścieżkę zagospodarowania, jaką jest recykling energetyczny.

Recykling energetyczny służy zagospodarowaniu głównie odpadów zanieczyszczonych lub zmieszanych (różne gatunki tworzyw sztucznych, materiały wielomateriałowe), dla których nakłady energetyczne poniesione na wydzielenie czystego polimeru lub monomeru znacznie przekroczyłyby wartość opałową odpadowego tworzywa [57]. Kategoria ta obejmuje zarówno spalanie (bezpośredni odzysk energii zmagazynowanej), półspalanie (zgazowanie) i termolizę odpadów polimerowych do związków będących standaryzowanymi paliwami samoiestnymi dopasowanymi do przetworzenia w danego rodzaju instalacjach. Na świecie użytkuje się w ten sposób 16% odpadów z tworzyw sztucznych. Technologie recyklingu energetycznego tworzyw można różnicować ze względu na stan skupienia paliwa (stałe, płynne).

Spalanie stałych odpadów z tworzyw sztucznych jako samodzielnego paliwa wymaga zastosowania pieców specjalistycznej konstrukcji, instalacji do wstępnego upłynniania (paliwo ciekłe) lub zgazowywania [58]. Standaryzacja paliw stałych odbywa się głównie przez mieszanie ich z innymi surowcami energetycznymi, mianowicie węglowym, trocinami, rozwałkionymi odpadami tekstylnymi itp. Przykładem standaryzowanego stałego paliwa o znaczącym udziale odpadów polimerowych jest SRF (ang. *Solid Recovered Fuel* – w/g normy EN 15359:2011) – paliwo zdefiniowane w CEN/TC-343, jako frakcja wytwarzana z odpadów innych niż niebezpieczne o dominującym udziale papieru, tekstyliów, tworzyw sztucznych i drewna. Zgodnie z normą, SRF może zawierać do 3% chloru (kl. 5). Ze względu na niską wartość opałową (c.a. 14,5 MJ/kg) SRF nie jest uważane za atrakcyjne samoiestne paliwo dla energetyki, a jedynie jako dodatek do pozostałych paliw.

Jedynym masowym odbiorcą SRF są dedykowane elektrownie opalane paliwem alternatywnym (32 instalacje w Niemczech) z rozbudowanymi instalacjami oczyszczania spalin działające na poziomie niskiej rentowności (pozyskiwanie SRF z odpadów komunalnych i jego spalanie w dedykowanej instalacji generuje koszt na poziomie 131–138USD/tonę odpadu komunalnego) [59÷61]. Innym znaczącym odbiorcą SRF są cementownie, gdzie paliwo to w połączeniu z miazem węglowym jest spalane w piecach obrotowych.

Wysoka temperatura powoduje rozkład PVC, a wapno wiąże chlor w warunkach spalania, pogarszając (niestety) jakość wytwarzanego produktu. Obecnie stopień zastąpienia paliw kopalnych w cementowniach sięga 50%, co wymaga stosowania wysokokalorycznych wsadów alternatywnych o wartości opałowej powyżej 20 MJ/kg (preferowane 23–25 MJ/kg) i niskiej zawartości chloru. Suszenie SRF może podnieść jego wartość opałową do ~19 MJ/kg, dalszy jej wzrost wymaga dodatkowego wzbogacania paliwa w komponenty o wysokiej energii, na przykład w odpadowe poliolefiny czy elastomery. Z tej aplikacji wykluczony jest PVC (niska wartość opałowa 18 MJ/kg i wysoka zawartość chloru w tworzywie – do 57%).

Innym sposobem zagospodarowania odpadowych tworzyw sztucznych jest zastosowanie ich jako nawęglacza w procesach metalurgicznych (substytut koksu). Standaryzowane odpadowe tworzywo sztuczne, po wprowadzeniu do komory spalania, ulega niepełnemu spalaniu, a powstałe produkty biorą udział w redukcji tlenków żelaza. Wymaga to jednak zastosowania paliwa o jeszcze wyższej wartości opałowej (powyżej 28 MJ/kg) i wysokim udziale PS – dominujący udział mają tworzywa o niskim stopniu zaawansowania korozji oksydacyjnej (dopuszczalne są zanieczyszczenia biologiczne i chemiczne materiału) – parametrach znacznie przekraczających możliwości paliw komponowanych na bazie SRF [62].

Druga ze ścieżek energetycznego zagospodarowania odpadów zakłada przetwórstwo do standaryzowanych paliw płynnych z przeznaczeniem ich na cele transportowe i grzewcze. Proces występuje w wielu wariantach technologicznych obejmujących termiczne odchlorowanie, pirolizę, kraking, wylewanie, a produktami są ciekłe frakcje paliwowe: oleju opałowego, napędowego i benzyn [63,64]. Przykładowo firma Klean Industries oferuje technologię pirolizy odpadów z tworzyw sztucznych: PE, PP, PS do frakcji węglowodorowej jakości lekkiego oleju opałowego lub diesla. Uruchomiona w 2000 r. w Sapporo pilotowa instalacja Plastics Recycle Company Ltd przetwarza rocznie ponad 13,3 tys. ton odpadów polimerowych. Pierwszy etap polega na usunięciu substancji obcych i wilgoci z odpadowych tworzyw, kolejnymi są łupanie, mielenie oraz suszenie (fluidalne). Część metali obecnych w strumieniu jest dodatkowo wydzielana elektromagnetycznie. Otrzymany produkt jest granulowany i przechowywany w silosach. Pierwszy z termicznych procesów obejmuje częściowy rozkład struktury tworzywa z wydzieleniem gazowego chlorowodoru (odzyskiwany w kolejnych operacjach), co umożliwi stosowanie surowca o zawartości PVC do 10%. Chlorowódor pozyskiwany w tego typu instalacjach zaspokaja c.a. 50% japońskiego rynku na kwas solny. Pozostałe substancje organiczne, które są obecne w strumieniu gazowym są wydzielane i dopalane katalitycznie. Drugi etap obejmuje pirolizę ciekłego strumienia węglowodorowego do oczekiwanych frakcji paliwowych i następczy rozdział destylacyjny. Pozyskane w ten sposób destylaty stanowią produkt handlowy (głównie olej napędowy i opałowy) niewymagający dodatkowych zabiegów stabilizacyjnych. Z każdej tony odpadów z tworzyw sztucznych wytwarzane jest do 700 kg frakcji węglowodorowych oraz c.a. 100 kg depozytu węglowego [65]. Pozostałe gazy są dopalane, a powstałe ciepło wykorzystywane na potrzeby własne instalacji. Wyższą jakość produktu można uzyskać m.in. poprzez głębszą przeróbkę, czy uszlachetnianie otrzymanych frakcji, ale wymaga to zwiększonych nakładów energetycznych i finansowych (instalacje wodorowe), częstokroć podważających ekonomię procesu. Alternatywny sposób uszlachetniania destruktyw z termolizy odpadów polimerowych został opracowany przez E. Śmigiera i in. [66]. Autorzy w swojej pracy wykazali, że stosując metanol (prekursor gazu syntezowego) można w dość łatwy sposób uszlachetniać frakcje węglowodorowe (zarówno benzynowe jak i dieslowskie) obniżając zawartość chloru, węglowodorów olefinowych i aromatycznych do poziomu akceptowanego minimum i poniżej. Rozwiązanie takie wydaje się być alternatywą atrakcyjną

dla małych rozproszonych instalacji przetwarzających do 10 tys. ton/r odpadowych tworzyw sztucznych [67]. Paliwem samoistnym jest również gaz syntezowy i metanol.

W Polsce już w latach 90-tych XX wieku działało kilka prototypów instalacji przetwarzających odpady polimerowe do frakcji paliwowych. Inicjatorem badań był m.in. L. Tokarzewski, współautor patentu na otrzymywanie paliw płynnych z ataktycznego polipropylenu [68]. Serce procesów były reaktory termicznego lub termokatalitycznego rozkładu polimerów w ciekłym oleju parafinowym lub w stopionym metalu. W niektórych wariantach technologicznych proces prowadzono periodycznie, co nie wpływało korzystnie na jego parametry energetyczne. Otrzymane niskiej jakości destrukty węglowodorowe rozdzielano destylacyjnie na frakcje paliwowe: benzynę i olej napędowy. Obecność niewielkich ilości PVC czy PS w przetwarzanym strumieniu dyskwalifikowała otrzymane szarże z dalszej eksploatacji – produkt charakteryzował się wysoką, nieakceptowaną zawartością chloru, węglowodorów aromatycznych. Gwarancją jakości produktu była przede wszystkim jakość wsadu. W oparciu o tę ideę powstały instalacje przemysłowe w Jaśle i Zabrze. Koncepcja pozyskiwania odpadu o wysokim stopniu czystości chemicznej, niezawierającego domieszek niepożądanych komponentów (PVC czy PS) nie sprawdziła się w praktyce; w późniejszym okresie podjęto decyzję o uszlachetnianiu produktu wodorem w rafinerii w Jędrzychowicach. Wraz ze zmianami legislacyjnymi z 2007 r. (nałożenie akcyzy na produkty) instalacje straciły na opłacalności ekonomicznej i zostały zamknięte [69].

### Model kompleksu surowcowo-energetycznego recyklingu odpadów z tworzyw

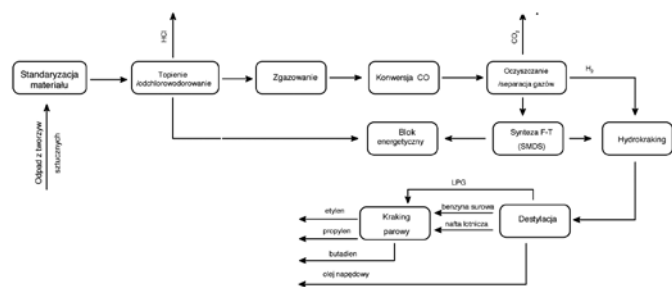
Żaden kraj nie jest w stanie poddawać wyłącznie recyklingowi materiałowemu wszystkich odpadów z tworzyw sztucznych, dlatego dobrze zorganizowana strategia zagospodarowania odpadów z tworzyw sztucznych powinna uwzględniać kilka form recyklingu.

Wszyscy zdajemy sobie sprawę z tego, że materiału nie można zwracać do przetwórstwa nieskończoną ilość razy; recykling materiałowy jest odroczeniem w czasie wyroku: odpad o niskiej przydatności.

Finałem wielocyklicznego życia tworzywa zawsze będzie recykling surowcowo-energetyczny.

Wykorzystując wcześniejsze własne doświadczenia z modelowaniem z udziałem strumienia gazu syntezowego [70], modele zgazowania odpadów z tworzyw sztucznych opisane przez Brems i in. [71], parametry energetyczne krakingu [38], analizie poddano model wielkoprzemysłowej instalacji recyklingu ze zgazowaniem jako etapem pośrednim. Zaletą procesu zgazowania jest możliwość wykorzystania gazu syntezowego jako standaryzowanego wysokokalorycznego nośnika energii, ale również jako źródła surowcowego (recykling chemiczny). W pracy przedstawiono kompleks przetwarzający odpady z tworzyw sztucznych w układzie skojarzonym: surowcowo-energetycznym. Rdzeniem układu jest instalacja bazująca na procesie Fischera-Tropscha (F-T) – wariant Shell MDS (ang. *Middle Distillate Synthesis*) [72], rozszerzona o układ upłynniania i odchlorowodorowania surowca i wytwórnię olefin. Wybór ścieżki przetwórstwa gazu syntezowego jest związany z deficytem olefin w Polsce skutkującym notorycznym niedorozwojem segmentu produktów na nim bazujących. Produkty olefinowe są w obszarze zainteresowań największych udziałowców krajowego przemysłu chemicznego [73]. Uzupełnieniem oferty jest wysokiej jakości frakcja oleju napędowego. Proces F-T jest atrakcyjny również ze względu na „wymazanie pamięci pochodzenia” przetwarzanego materiału (nie dotyczy izotopów promieniotwórczych) realizowane poprzez pełną destrukcję molekuł i budowę od podstaw wszystkich wiązań chemicznych. Technologia pozwala na skuteczne usunięcie zanieczyszczeń, wtrąceń pierwiastków, które zostały wprowadzone do tworzywa podczas jego syntezy, przetwórstwa czy podczas eksploatacji finalnego wyrobu, a które są niepożądanym skład-

nikiem produktów recyklingu. Proces Fischera-Tropscha jest dobrze poznany i opanowany, od wielu lat działają duże instalacje w RPA i Maledywii produkujące w oparciu o tę technologię.



Rys. 4. Schemat blokowy kompleksu energetyczno-surowcowego recyklingu odpadów polimerowych

Analizowany kompleks składa się z bloków, w których realizowane są kluczowe dla procesu operacje i procesy. Schemat układu przedstawiono na Rysunku 4. Blok standaryzacji surowca obejmuje, operacje takie jak mielenie, suszenie, oddzielanie metali. Pierwszym chemicznym etapem procesu jest upłynnienie surowca. Tworzywa sztuczne nie zawierają znaczących ilości związków siarki czy azotu, problematyczne jest natomiast zagospodarowanie odpadowego PVC – zawierającego do 57 %mas. chloru. W trakcie upłynniania, stapienia odpadów ze strumienia wydzielany jest chlorowódz pochodzący z rozkładu PVC. Zastosowanie upłynniania pozwala na wykorzystanie takich odpadów polimerowych, które w innej sytuacji trafiłyby na składowisko odpadów. Wsadem w procesie mogą być odpadowe tworzywa olefinowe, spieniony PS (upłynnianie znacząco zmniejsza gabaryty tej grupy materiałów), jak również PET i inne tworzywa o zwiększonym stopniu destrukcji oraz do 10% PVC (tworzywo to ma ~10% udział w europejskim rynku polimerów – Tab. 2). Dominującą część strumienia, zawierającego pozbawione chlorowodoru tworzywo, kierowano do zgazowarki, gdzie ulegało ono częściowemu spalaniu z wytworzeniem gazu syntezowego. W tym etapie następuje również oddzielenie mineralnych składników tworzyw oraz rozpad dodatków organicznych do tworzyw zawierających pierwiastki inne niż C i H. Zanieczyszczenia przechodzące do strumienia gazowego są wydzielane w kolejnych etapach oczyszczania gazu. Część płynnego tworzywa kierowano do układu reformingu parowego, celem wzbogacenia w wodór mieszanki procesowej, a następnie na układ oczyszczania gazów i do reaktora F-T. Relacja C:H<sub>2</sub> w komponowanym gazie syntezowym kształtowała się na poziomie 1:2,05 – 1:2,44. Pozostałe upłynnione tworzywo było wykorzystywane jako zaplecze energetyczne pirolizy olefinowej. Po oczyszczeniu strumień kierowano do instalacji F-T. W procesie zastosowano układ SMDS zoptymalizowany do produkcji oleju napędowego i benzyny, kosztem paliwa lotniczego. Pozyskane w ten sposób frakcje LPG, paliwa lotniczego oraz benzyny surowej kierowano na instalację krakingu parowego pracującego w reżimie *high severity* (temp. 900–1100°C, czas kontaktu 0,5"). W kompleksie wytwarzano: olej napędowy o wysokiej liczbie cetanowej – LC≈54 (recykling energetyczny) oraz lekkie olefiny: etylen, propylen, frakcję C<sub>4</sub> zawierającą butadien (recykling surowcowy). Zastosowane profilu paliwowo-chemicznego pozwoliło na wykorzystanie potencjału energetycznego tworzyw – część strumienia wykorzystano jako paliwo na potrzeby instalacji (recykling energetyczny) oraz na wytworzenie towarów kluczowych na rynku wewnętrznym. Analizy własne wskazują, że sprzężenie procesu F-T z wytwórniami lekkich olefin (produktów o znaczącej wartości dodanej) znacząco poprawiło rentowność całego kompleksu (ROI≈15%). Skala produkcji wyniosła w tys. ton: oleju napędowego – 472, etylenu – 181, propylenu – 73, butadienu – do 45. W tych warunkach zdolności przerobowe kompleksu zawierają się w przedziale 1,4–1,6 mln ton/rok wsadu (zależnie od udziału w strumieniu odpadu

z PVC). Wartość ta jest porównywalna z ilością odpadów z tworzyw sztucznych wytwarzanych w Polsce w ciągu roku [8]. Energochłonność procesu zawiera się w przedziale 37–41 MJ/kg produktu (średnio 38,7 MJ/kg) i jest to koszt energetyczny związany z wymazaniem „pamięci pochodzenia” surowca – odtworzeniem struktury monomeru przy jednoczesnym zachowaniu energii wiązań chemicznych wytworzonej frakcji paliwowej (ON). Wartość ta znajduje się w przedziale 80–100% wartości opałowej produktów – obszar przejściowy dla akceptowanego energetycznie recyklingu chemicznego. Niekwestionowaną wartością dodaną procesu jest przetworzenie, zagospodarowanie energii odpadów z PVC. Analizowany kompleks jest w stanie w całości wyeliminować strumień odpadów kierowanych dotychczas na składowiska, wysypiska, równocześnie realizując wytyczne zapisane w europejskiej strategii dotyczącej odpadów z tworzyw sztucznych w środowisku – *Zero Plastics to Landfill* [74].

Zdolności przerobowe pojedynczego kompleksu są równoważne wolumenowi wytwarzanych w Polsce odpadów z tworzyw. Może to budzić obawy o brak rezerwy surowcowej, w sytuacji zaistnienia alternatywnych rozwiązań technologicznych. Racjonalnym i prawdopodobnym rozwiązaniem wydaje się praca instalacji w systemie zdywersyfikowanego surowca, wsad uzupełniony o węgiel, gaz łupkowy, biomasę czy odpady z innych grup produkcyjnych (alternatywny wsad surowcowy) czy w systemie zdywersyfikowanego paliwa (zmniejszony udział odpadów z tworzyw w strumieniu energetycznym). Wyniki prac wykonanych w projekcie PBZ p.t.: „Chemia perspektywicznych procesów i produktów konwersji węgla” wskazują, że zbliżony strukturalnie kompleks petrochemiczno-energetyczny bazujący wyłącznie na węglu kamiennym charakteryzuje się porównywalną stopą zwrotu (ROI≈18%), przy zdolności przerobowej c.a. 8 mln ton węgla/rok i dwukrotnie większej skali produkcji [70]. Konsumpcja węgla w tej instalacji stanowi niewiele ponad 10% krajowego rynku węgla (w 2013 r., w mln ton: wydobyć 76,5; eksport 10,6; import 10,8), a ze względu na znaczne rezerwy wydobywcze, nie generuje zagrożenia dla zaburzenia rynku tego surowca [75,76]. Możliwość racjonalnego ekonomicznie uzupełnienia strumienia odpadów polimerowych surowcami alternatywnymi pochodzącymi z krajowych źródeł, czyni przedstawione rozwiązanie stabilnym surowcowo i atrakcyjnym inwestycyjnie.

### Podsumowanie

Gospodarka komunalna i przemysł w Polsce nie są dostatecznie przygotowani do prowadzenia w szerokim zakresie recyklingu materiałowego i chemicznego odpadów z tworzyw sztucznych znajdujących się w strumieniu odpadów komunalnych. Jest to wynikiem braku, nie tylko zresztą w Polsce, systemów pozwalających wyodrębnić określone asortymenty tworzyw polimerowych (czyste gatunkowo), o zdefiniowanym wieku (liczba dotychczasowych cykli pracy) i prawdopodobnym pochodzeniu, a także zdolności przetwórczych pozwalających na wysokotonażowy systemowy ich przerób. Wysokie koszty *upgradingu* i standaryzacji (oczyszczania) produktów chemicznego recyklingu odpadów tworzyw sztucznych nie uzasadniają ich szerokiego stosowania jako materiałów pędnych dla pojazdów flotowych, bądź olejów opałowych. To samo dotyczy monomerów otrzymywanych jako produkt depolimeryzacji termolitycznej lub chemicznej, poza prekursorami najbardziej szlachetnych gatunków tworzyw sztucznych.

Alternatywne dla powyższych metod recyklingu są różne formy odzysku energetycznego: spalanie, piroliza, zgazowanie i ich kombinacje. Rozwiązania takie można stosować w znacznie większej skali od wymienionych wcześniej, unikając ograniczeń i niedogodności z nimi związanych.

Istotną zaletą procesu zgazowania jest możliwość wykorzystania gazu syntezowego jako standaryzowanego wysokokalorycznego nośnika energii, ale również jako odnawialnego źródła surowcowego dla co najmniej kilku petrochemicznych drzew produktowych (np. drzewo produktowe metanolu, olefin czy tlenku węgla).

Wyniki przedstawione w pracy wskazują, że pomimo negatywnych wcześniejszych doświadczeń w Polsce z paliwowym kierunkiem recyklingu odpadów z tworzyw sztucznych, wielkoprzemysłowy kompleks zagospodarowania odpadów z tworzyw sztucznych via proces F-T jest możliwy do realizacji w oparciu o krajową bazę surowcową, jak również opłacalny i atrakcyjny inwestycyjnie. Opisane rozwiązanie jest w stanie przejąć cały strumień odpadów z tworzyw kierowanych dotychczas na składowiska, wysypiska i zagospodarować go wykorzystując różne formy recyklingu.

#### Literatura:

1. *Guide to Energy Efficiency Opportunities in the Canadian Plastics Processing Industry*, Natural Resources Canada's Office of Energy Efficiency, Canada, 2007, 13, 33.
2. James D. H., Castor W. M., *Styrene Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley-VCH, 2005.
3. Baekeland L. H., US Pat. 942699 A/1907.
4. Mark, F.E. *The role of plastics in municipal solid waste combustion*" APME 1994.
5. Gervet B., *The use of crude oil in plastic making contributes to global warming* –Lulea University of Technology, Sweden 2007.
6. *Census of dyes, and of other synthetic chemicals – 1927* US. International Tariff Commission, Tariff Information Series, No. 37, US. Gov. Printing Office, 1927, 23.
7. *An analysis of plastics production, demand and recovery for 2005 in Europe* – materiał inf. Plastics Europe (Stowarzyszenie Producentów Tworzyw Sztucznych), <http://www.plasticseurope.org/>.
8. Engelmann M., *Zero Plastics to Landfill – lessons learned in Europe* – materiał inf. Plastics Europe (Stowarzyszenie Producentów Tworzyw Sztucznych) <http://www.plasticseurope.org/>.
9. *Fakty o tworzywach sztucznych 2007 Analiza produkcji, zapotrzebowania i odzyskiwania tworzyw sztucznych w roku 2007 w Europie* – – materiał Plastics Europe (Stowarzyszenie Producentów Tworzyw Sztucznych), <http://www.plasticseurope.org/>.
10. Rosato D. V., *Plastics China: Technologies, Markets and Growth strategies to 2008*, Elsevier Ltd. 2005.
11. *Tworzywa sztuczne – Fakty 2013 Analiza produkcji, zapotrzebowania oraz odzysku tworzyw sztucznych w Europie* – materiał inf. Plastics Europe (Stowarzyszenie Producentów Tworzyw Sztucznych), <http://www.plasticseurope.org/>.
12. *Independent Market Report on the Global and Indonesian Petrochemicals Industry* Nexant Industry Report, 2011.
13. materiały inf. International Aluminium Institute <http://www.world-aluminium.org/statistics>.
14. *Steel statistics yearbook 2014* – World Steel Association, 2014, <http://www.worldsteel.org/>.
15. *World steel in figures 2012*, World Steel Association, 2012, <http://www.worldsteel.org/>.
16. *Pulp and paper capacities 1975–1980* Food And Agriculture Organization Of The United Nations, 1976, p. I-1, I-2, I-3., <http://www.fao.org/forestry/statistics/81757/en/>.
17. *2014 Annual Review of Global Pulp and Paper Statistics*, <http://www.risiinfo.com/pages/product/pulp-paper/>.
18. materiał inf. The Statistics Portal <http://www.statista.com/topics/1701/paper-industry/>.
19. Żakowska H., *Badania materiałów opakowaniowych pod kątem recyklingu organicznego – kompostowania*. *Opakowanie* 2010, 8, 46–48.
20. Arutchelvi J., Sudhakar M., Arkatar A., Doble M., Bhaduri S., Uppara P. V., *Biodegradation of polyethylene and polypropylene* Indian Journal of Biotechnology, 2008 v.7, 9–22.
21. Jordan W., van Barneveld H., Gerlich O., Kleine-Boymann M, Ullrich J. *Phenol*. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 5th ed., VCH (1991),
22. Lipinsky E., Wesson R., *Characterization of the Top 12 U.S. Commodity Polymers*. A Pacific Northwest National Laboratory report submitted to the U.S. Department of Energy, Biological and Chemical Technology Research Program. (1995).
23. Worrell, E., de Beer J.G., Faaij A.P.C. and Blok K., *Potential energy savings in the production route for plastics*, *Energy Conservation and Management*, vol.35 no. 12, 1073–1085 (1994).
24. Worrell E., Phylipsen D., Einstein D., Martin N. *Use and Energy Intensity of the U.S. Chemical Industry* (2000) Energy Analysis Department Energy, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
25. U.S. Energy Information Administration: "How much oil is used to make plastic?" <http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=34&t=6>.
26. *Natural Gas Prices* U.S. Energy Information Administration [http://www.eia.gov/dnav/ng/ng\\_pri\\_sum\\_dcu\\_nus\\_m.htm](http://www.eia.gov/dnav/ng/ng_pri_sum_dcu_nus_m.htm).
27. dane statystyczne Eurostat: [http://ycharts.com/indicators/europe\\_natural\\_gas\\_price](http://ycharts.com/indicators/europe_natural_gas_price),: [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php/Electricity\\_and\\_natural\\_gas\\_price\\_statistics](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Electricity_and_natural_gas_price_statistics).
28. "VCM and PVC in China", Tecnon OrbiChem Report July 2006.
29. "Vinyl Chloride Monomer/Ethylene Dichloride (VCM/EDC)" Nexant PERP Report 2013–6.
30. *Recycling: Cost analysis and energy balance* Environmental Protection Authority, Bulletin 409, Western Australia 1990, 12–16.
31. Ashby N.M. F., *Materials and the environment: eco-informed material choice*. Elsevier Science & Technology, Canada: 2009.
32. Engelbeen F., *Plastics Environmental Aspects*. (<http://ces.iisc.ernet.in/hpg/envis/plasdoc612.html>).
33. Poly-ethyleneterephthalate (PET) Bottle grade Plastics Europe, Heidelberg 2010.
34. *Recycling: Cost analysis and energy balance* Australian Environmental Protection Authority, Bulletin 409, November 1990.
35. U.S. Energy Information Administration: "How much oil is used to make plastic?" <http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=34&t=6>.
36. Dominov P., Gilyazetdinova R., Zhirnov B., Tarasov I., Khlestkin R., *Overview world technologies of pyrolysis and perspective of development Oil and Gas Bussines* (2010).
37. Ren T., Patel M., Blok K., *Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processe,s* *Energy* 31 (2006) 425–451.
38. Aznalin R.R., Arslanov M.M, Akhmetov A.F., Balyanov A.G., *Refinery technological processes integration. Propylene production on fcc unit*. *Oil and Gas Bussines* (2010) no 1. UDC 665.7.
39. Bulatov R.M., Jirnov B.S. *Fcc process of heavy feed stock with improved yield of light olefins.*, *Oil and Gas Bussines* (2010) no 1. UDC 665.7.
40. Wan V. Y., *Propylene production via metathesis of ethylene and butenes*, SRI PEP Report Rev. No. 2011–04.
41. U.S. Energy Requirements for Aluminum Production, U.S. Department of Energy 2007.
42. A Comparison of Iron and Steel Production Energy Use and Energy Intensity in China and the U.S., raport -LBNL-4836E (2011).
43. *Crude steel production, 1980–2013*, – materiał inf. World Steel Association, 2014, <http://www.worldsteel.org/>.
44. *Guide to Energy Efficiency Opportunities in the Canadian Plastics Processing Industry*, Natural Resources Canada's Office of Energy Efficiency, Canada, 2007, p. 13.
45. Duque C. N., Gutowski, T. G., Garetti M. A.; *Tool to Estimate Materials and Manufacturing Energy for a Product*, Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2010 IEEE International Symposium.
46. *2005 European Benchmarking Survey Of Energy Consumption And Adoption Of Best Practice*" RECIPE, 2006.
47. *Plastics Industry Energy Best Practice Guidebook*, FOCUS ON ENERGY, 2006.
48. Bousted I., *Eco-profiles of the European Plastics Industry: Polyethylene Terephthalate (PET), (Bottle grade)*. Plastics Europe. March 2005. <http://lca.plasticseurope.org/petb5.htm>.
49. *Low Energy Plastics Processing*, RECIPE European Best-Practice Guide, 2006, [http://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/recipe\\_low\\_energy\\_plastics\\_processing.pdf](http://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/recipe_low_energy_plastics_processing.pdf).
50. Vogt, M., *Infrared drying lowers energy costs and drying times*, *Plastics, Additives and Compounding* (2007) Vol.9, (5), September – October, 2007, 58–61.
51. Markarian, J. *Energy efficient auxiliaries take a lead in controlling compounding costs*, *Plastics, Additives and Compounding* (2007) Vol. 9, ( 5), 54–57.
52. Balcerzak P., Mroziński A., *Analiza efektywności systemu odzysku ciepła ze sprężarek powietrza*, *Inż. Ap. Chem.* 2012, 51.( 3), 68–69.
53. materiały inf. firmy „MS więcej niż OKNA” [http://www.obud.pl/okna-art,9096„stolarka\\_okienna\\_bez\\_tajemnic](http://www.obud.pl/okna-art,9096„stolarka_okienna_bez_tajemnic).



54. Praca zbiorowa pod red. Skalmowski K. *Poradnik gospodarowania odpadami*. Wydawnictwo Dashoefer Sp. z o. o., 2001.
55. materiały inf. firmy BYŚ- Wojciech Byśkiniewicz.
56. Wójcik P., *Odzysk Odpadów z Tworzyw Sztucznych, Odpady i Środowisko nr 4(70)/11*, 50–57.
57. Sobolewski A., Wasilewski R., Stelmach S., *Wykorzystanie stałych paliw wtórnych w energetyce*, *Polityka Energetyczna*, 10, z.s.2, (2007), 379–389
58. Wielgosinski G., *Przegląd technologii termicznego przekształcania odpadów* *Nowa Energia nr 1/2011*, 55–67.
59. Wielgosinski G., *Wybór technologii termicznego przekształcania odpadów komunalnych* *Nowa Energia nr 1/2012*, 66–79.
60. Wielgosinski G., *Czy instalacja mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych może być alternatywą dla spalarni odpadów?* mat. konf. XI Konferencja DLA MIASTA I ŚRODOWISKA – Problemy Unieszkodliwiania Odpadów Warszawa, 2013.
61. Sorek A., Borecki M., Ostrowska-Popielska P., *Wybrane odpady z tworzyw sztucznych, jako źródło paliw alternatywnych w przemyśle metalurgicznym*, *Prace IMŻ 4* (2012), 47–57.
62. materiał inf. firmy Xinxiang Huayin Renewable Energy Equipment Co.,Ltd, <http://www.pyrolysis-oil.com/>
63. materiał inf. firmy Plastic Pyrolysis Plant, <http://www.plasticpyrolysisplant.com/>
64. materiał inf. firmy Klean Industries, <http://www.kleanindustries.com/s/Home.asp>
65. Śmigiera E., Osawaru O., Kijeński J., Migdał A., Zgudka A. *Reduction of waste pyrolysis fraction over PT/AL2O3 with methanol-decomposition hydrogen to obtain fuel-grade hydrocarbons*. *Journal of Chemistry* vol. 2014, Article ID 938696, 9 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/938696>
66. Śmigiera E., Osawaru O., Kijeński J., Zgudka A., Migdał A. R., *Metanol jako donor wodoru w syntezie paliw alternatywnych*, *Chemik 6/2013*, 502–507
67. Tokarzewski L., Hołdyk-Koźbiał B., Ossowski J., Pruszkowski C., Gatner H., Cichoński S., Wachowicz J., Szulakowski W., Pat. PL 149887.
68. Mianowski A., Walendziewski J., *Odzysk energetyczny w monografii pod red. J. Kijeński, A.K. Błędzki, R. Jeziórska Odzysk i recykling materiałów polimerowych WN PWN, Warszawa 2011*.
69. Kijeński J., Rejewski P. *Synteza produktów chemicznych z gazu ze zgazowania węgla*, w monografii pod red. J. Kijeński i M. Ściążko, *Studium koncepcyjne wybranych technologii, perspektywicznych procesów i produktów konwersji węgla – osiągnięcia i kierunki badawczo rozwojowe. Tom 2. Synteza produktów chemicznych*. Zabrze 2010.
70. Brems A., Dewil R., Bayens J., Zhang R., *Gasification of plastics waste-to energy or waste –to-syngas recovery route*. *Natura Science*, vol. 5(6) 695–704.
71. *CO<sub>2</sub> abatement in Gas-To-Liquids plant: Fischer-Tropsch synthesis*. IEA Greenhouse Gas Report Numer PH/15, 2000
72. Informacje prasowe Grupy Lotos [http://www.lotos.pl/322/p,174,n,3712/grupa\\_kapitalowa/centrum\\_prasowe/aktualnosci/grupa\\_lotos\\_w\\_konsorcjum\\_z\\_azotami\\_tarnow](http://www.lotos.pl/322/p,174,n,3712/grupa_kapitalowa/centrum_prasowe/aktualnosci/grupa_lotos_w_konsorcjum_z_azotami_tarnow)
73. ZIELONA KSIĘGA w sprawie europejskiej strategii dotyczącej odpadów z tworzyw sztucznych w środowisku. Komisja Europejska Bruksela 2013.
74. Dane GUS za rok 2013,
75. materiały inf – Statista Inc., <https://www.statista.com>
76. *Reduced Energy Consumption in Plastics Engineering*. RECIPE European benchmarking survey of energy consumption and adoption of best practice, 2005.
77. Kuhlke B., Walsh T., *World Plastics Market Review* – mat konf. Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (ANTEC 2002) USA 2002.
78. Mércia Barbosa Cavalcante F., PhD thesis: *Copolymerization of Ethylene and Polar Monomers by Metallocene Catalyst*, Department of Chemistry, University of Hamburg, 2007. 9.
79. Materiały inf. firmy InterTradelreland, pt: *A Competitiveness Analysis of the Polymer and Plastics Industry on the Island of Ireland*".

Dr inż. Antoni R. MIGDAŁ ukończył studia na Wydziale MiTO Politechniki Radomskiej, kierunek Materiałoznawstwo Produktów Naftowych (1999). Stopień doktora nauk chemicznych uzyskał w 2006 r. na Politechnice Warszawskiej. Od 2004 r. zatrudniony w Instytucie Chemii Przemysłowej im. prof. Ignacego Mościckiego, obecnie na stanowisku adiunkta w Zakładzie Proekologicznej Modernizacji Technologii. Specjalność – technologia chemiczna.

Prof. dr hab. inż. Jacek KIJEŃSKI 25 września br. został po raz czwarty wybrany na prezesa Zarządu Głównego Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Przemysłu Chemicznego podczas 30. Walnego Zjazdu Stowarzyszenia. Prof. J. Kijeński ma 64 lata. Jest wybitnym specjalistą w dziedzinie chemii i technologii chemicznej oraz w zakresie kierunków i strategii rozwoju przemysłu chemicznego, katalizy, przemysłowej syntezy organicznej i recyklingu odpadów z tworzyw sztucznych. Jest profesorem zwyczajnym Politechniki Warszawskiej, kierownikiem Zakładu Proekologicznej Modernizacji Technologii w Instytucie Chemii Przemysłowej im. prof. Ignacego Mościckiego. Prezesem ZG ITPChem jest od 2002 r. Jest członkiem prezydium Komitetu Chemii Polskiej Akademii Nauk, koordynatorem Polskiej Platformy Technologicznej Wodoru i Ogniw Paliwowych, członkiem Stałego Komitetu Kongresów Technologii Chemicznej, Stowarzyszenia Wynalazców i Racjonalizatorów, Polskiego Stowarzyszenia Przetwórców Tworzyw Sztucznych, a także rad programowych czasopism *Przemysł Chemiczny* (przewodniczący), *Chemik*, *Polimery*, *Wiadomości Chemiczne* (do 2007 r.) i *Ochrona przed Korozją*. Jest członkiem Międzynarodowej Unii Chemii Czystej i Stosowanej (IUPAC), niemieckiego Towarzystwa Technologii Chemicznej i Biotechnologii DECHEMA, American Chemical Society, Network for Industrial Catalysis in Europe (NICE) oraz European Federation of Chemical Engineering (EFCE). Światowa Organizacja Własności Intelektualnej WIPO w 2006 r. przyznała Profesorowi tytuł Outstanding Inventor. Prof. Jacek Kijeński jest autorem lub współautorem ponad 200 publikacji, ponad 200 wystąpień konferencyjnych, 10 monografii i 40 patentów. Oprócz tego, że jest inżynierem i naukowcem o uznanym dorobku prof. Jacek Kijeński jest również wybitnym humanistą, erudytą, znawcą literatury, sztuki i historii cywilizacji. Obszerną biografię prof. J. Kijeńskiego opublikowaliśmy w *Przem. Chem.* 2006, 85, 7, 1396, a notkę o nim zamieściliśmy w *Przem. Chem.* 2008, 87, 5, 633. ZG SITP-Chem, 30 października 2014 r.

Mgr inż. Andrzej KAWALEC absolwent Wydziału Nowych Technologii i Chemii WAT, od 2011 r. pracownik Zakładu Proekologicznej Modernizacji Technologii IChP.

Mgr inż. Andrzej KĘDZIORA ukończył Wydział Chemiczny Politechniki Wrocławskiej (2004). Pracuje na stanowisku Prezesa Zarządu w biurze projektowym Weyer Polska Sp. z o.o. Jest doktorantem w Instytucie Chemii Przemysłowej im. prof. Ignacego Mościckiego w Warszawie. Specjalność – inżynieria chemiczna i procesowa. Zainteresowania: fotografia i konie.

Mgr inż. Paweł REJEWSKI ukończył studia w Instytucie Inżynierii Chemicznej Politechniki Warszawskiej. Pracuje w Instytucie Chemii Przemysłowej w Warszawie. Jest specjalistą w zakresie inżynierii kosztów, optymalizacji złożonych systemów procesowych oraz prognozowania rozwoju rynków i struktur wytwórczych firm chemicznych. Zajmuje się działalnością badawczą i projektową w zakresie analizy systemowej i optymalizacji ekonomicznej sieci technologicznych. Autor i współautor kilkunastu publikacji i referatów oraz licznych opracowań programowych dla przedsiębiorstw i ośrodków decyzyjnych w przemyśle chemicznym.

Dr inż. Ewa ŚMIGIERA ukończyła studia na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej (1998) i od tego czasu pracuje w Instytucie Chemii Przemysłowej w Warszawie. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskała w 2007 r. w IChP i obecnie jest adiunktem w Zakładzie Proekologicznej Modernizacji Technologii. Specjalność: technologia chemiczna organiczna. W 2013 r. ukończyła studia podyplomowe dla pracowników jednostek naukowych „Zarządzanie projektami badawczymi i pracami rozwojowymi” w Wyższej Szkole Ekonomii i Innowacji w Lublinie.