

PAWEŁ REJEWSKI<sup>1)</sup>, JACEK KIJEŃSKI<sup>2)</sup>

## Zużyte polimery – dostępne i perspektywiczne źródła surowcowe dla procesów recyklingu

**Streszczenie** – Przedstawiono wyniki analizy i ocen modeli bilansowych (szacunkowego, skorygowanego i zaawansowanego dynamicznego) łańcucha przemian polimerów w gospodarce krajowej „od produktu do odpadu poużytkowego”. Bilanse te, aczkolwiek wykazują zadowalającą zgodność, charakteryzują się znacznym poziomem niepewności nie tylko w Polsce, lecz i w UE. Jest to spowodowane zarówno dynamicznym charakterem takich przemian, jak i różnymi parametrami segmentacji rynku polimerów w ich przemysłowych i końcowych zastosowaniach. Istnieją również istotne różnice we wzajemnych relacjach producentów, przetwórców, konsumentów oraz środowiska odbiorców polimerów zużytych. Podano podstawowe rezultaty oceny aktualnej dostępności surowcowej odpadów polimerowych w Polsce wraz z długoterminową prognozą.

**Słowa kluczowe:** zużyte polimery, recykling, dostępność surowcowa, perspektywy.

### WASTE POLYMERS – AN AVAILABLE AND PERSPECTIVE RAW MATERIALS FOR RECYCLING PROCESSES

**Summary** – An analysis and the evaluation of balance models (static-approximate, corrected and dynamic-advanced) of polymer transformation chain “from products to post-consumer waste in the local economy has been presented. The balance for the polymer economy, though in good agreement, is characterized by a high level of uncertainty not only for Poland, but also for the EU (Tables 1–4, Fig. 2). This has been the result not only of the dynamic character of changes taking place, but also of the different fragmentation factors in the market concerning industrial and consumer applications. Moreover, there is also the issue of crucial difficulties in the mutual relationship between manufacturers, processing facilities, consumers and the waste polymer processing facilities. The general situation, with special consideration of the current availability of waste polymers for applications as raw materials in Poland and a long-term prognosis has been presented.

**Keywords:** waste polymers, recycling, material availability, future perspectives.

### OBSZAR BILANSOWY PRODUKCJI I PRZEMIAN POLIMERÓW

Opracowanie wiarygodnych bilansów oraz prognoz dostępności surowcowej polimerów w procesach recyklingu wymaga przeprowadzenia analizy zależności w całym łańcuchu przemian: produkcja – dystrybucja – konsumpcja – koniec eksploatacji (przetwarzanie i składowanie odpadów). Łańcuch ten obejmuje całkowity „czas życia” poszczególnych polimerów w gospodarce. Obszar bilansowy jest więc nie tylko rozległy i poddawany wpływom zewnętrznych strumieni (import/eksport) niemal na każdym etapie przemian, lecz w istocie – w ostatnich ogniwach „cyklu życia” (eksploatacja dóbr konsumpcyjnych do chwili, gdy staną się „dobrami odpadowymi”, a nieco później odpadem) – słabo określony. Mają na to poważny wpływ strumienie zewnętrzne (import i eksport w postaci dóbr gotowych, zawierających składniki polimerowe).

Należy podkreślić, że strumienie zawracane (obrótny lub recykling mechaniczny) w dłuższej perspektywie nie mogą spowodować istotnej redukcji, a tym bardziej zaniku strumienia odpadów opuszczających obszar bilansowy (kierowanych na składowiska, bądź do innego wykorzystania). Wynika to z charakteru procesów z zawracaniem reagentów do obiegu. Realne możliwości długotrwałej redukcji „problemu składowisk” stwarza przede wszystkim utylizacja odpadów w procesach recyklingu surowcowego lub recyklingu energetycznego. Jest to odmienny punkt widzenia problemu, niż wynika z zalecanej przez organa UE następującej hierarchii postępowania (w kolejności od najbardziej do najmniej pożądanego sposobu):

- zapobieganie,
- ponowne użycie,
- recykling,
- spalanie (z odzyskiem energii),

<sup>1)</sup> Instytut Chemii Przemysłowej, ul. Rydygiera 8, 01-793 Warszawa, e-mail: pawel.rejewski@ichp.pl

<sup>2)</sup> Politechnika Warszawska, Szkoła Nauk Technicznych i Społecznych, ul. Łukaszczyka 17, 09-400 Płock, e-mail: j.kijenski@pw.plock.pl

– unieszkodliwianie na składowiskach.

Zalecane zgodnie z tą hierarchią postępowanie można uznać za mało skuteczne, ponieważ stoi ono w istotnej sprzeczności z „naturą” strumienia w rozważanym obszarze bilansowym. Warunkiem skuteczności zalecanej polityki jest ograniczenie strumienia wejściowego do obszaru bilansowego (czyli produkcji polimerów pierwotnych). Wątpliwe jest, by globalne koncerny produkujące polimery w Unii Europejskiej (UE) dobrowolnie ograniczyły nowe metody wytwarzania, na rzecz „bardziej pożądanego” obrotu wtórnego albo recyklingu mechanicznego. Przeciwnie, producenci wykazują chęć konsekwentnego zwiększania produkcji, co prowadzi do wytwarzania wyrobów o malejącej trwałości (żywności), wymagających częstego odtwarzania, za to kierowanych do odbiorcy w łatwej do zbycia postaci (atrakcyjne opakowanie). Indywidualny nabywca jest z kolei zainteresowany zakupem dóbr o możliwie największej żywotności, czyli zapobieganiem powstawania odpadów w sposób „naturalny”, lecz w większości przypadków (przynajmniej w Polsce) podstawowym kryterium wyboru pozostaje kryterium cenowe. W konsekwencji następuje coraz szybsza rotacja materiałowa w łańcuchu przemian i polityka zapobiegania przegrywa z „tanią, łatwą i szybką” konsumpcją powodującą zwiększanie się strumienia odpadów. Zwłaszcza dotyczy to wszechobecnych dóbr konsumpcyjnych zawierających materiały polimerowe, w dużej mierze równie nietrwałych jak ich opakowania, dystrybuowanych wprawdzie na rynkach UE, lecz pochodzących z krajów dalekowschodnich.

#### SKORYGOWANE SZACUNKOWE BILANSE ODPADÓW

Postępowanie się w bilansach i prognozach wyłącznie oficjalnymi danymi statystycznymi obejmującymi jedynie ewidencyjne zestawienia dotyczące podobszaru „odpady” nie stwarza możliwości wystarczająco dokładnych oszacowań w kategorii przydatności do procesów recyklingu ze względu na brak wystarczających danych, mianowicie jakościowych i ilościowych charakterystyk odpadów polimerowych. Nie umożliwia także wykonania godnych zaufania prognoz dostępności, zwłaszcza długoterminowych.

Skutkiem ubocznym dość dowolnych interpretacji definicji poszczególnych grup odpadów polimerowych jest z reguły niewielka wiarygodność publikowanych danych i (bardzo nielicznych) prognoz. Dla ilustracji problemu dokonano konfrontacji oficjalnych danych publikowanych bądź przez Główny Urząd Statystyczny (GUS), bądź też przez Ministerstwo Ochrony Środowiska (MOŚ); te drugie stanowią Krajowe Plany Gospodarki Odpadami (KPGO). Uzyskane przez nas zestawienia pokazują jako przykład skalę rozbieżności ocen bilansowych strumienia zużytych polimerów w odpadach komunalnych (tabela 1). Jedną z przyczyn jest tu uwzględnianie przez GUS jedynie ilości odpadów zebranych na nieco ponad 1000 legalnych składowisk z pominięciem

odpadów kierowanych na 2200–3000 składowisk nielegalnych. Bliższe rzeczywistości, lecz także niewystarczająco wiarygodne – a to ze względu na występującą niezgodną ze stanem faktycznym rejestrację ilości odpadów trafiających na składowiska – są dane zawarte w KPGO.

**T a b e l a 1. Szacunkowa i prognozowana ilość polimerów w odpadach komunalnych w Polsce (w 10<sup>9</sup> kg/r.)**

**T a b l e 1. Estimated amount and prognosis for communal polymer wastes in Poland (in million tons)**

Źródło / Rok	2000	2004	2005	2006	2010	2014	2016	2018
GUS	1,77	1,44	1,38	1,48	–	–	–	–
KPGO – 2002	1,96	–	2,33	2,42	3,44	4,27	4,58	–
KPGO – 2010	–	1,75	–	–	2,35	2,82	–	2,99

Wyniki nowszej (za rok 2010) prognozy wg KPGO można uznać za bardzo optymistyczne. Wynikają one z założenia przez zespół opracowujących je ekspertów wyjątkowo korzystnych zmian technologicznych w produkcji tworzyw opakowaniowych (ograniczenie zużycia polimerów w tej dziedzinie). Z bilansu tworzyw odpadowych wyeliminowano także (spodziewając się zmian technologicznych) opakowania kompozytowe. W bilansie nie uwzględniono również tworzyw zawartych w tzw. „odpadach wielkogabarytowych”. Na dodatek, przedstawione oszacowania i prognozy dotyczą tylko odpadów „ewidencjonowanych” i eliminują z bilansów niemal wszystko, co nie jest typowym odpadem opakowaniowym, łatwym do zebrania, segregacji i procesów recyklingu.

Rzeczywista ilość odpadów polimerowych powstających w gospodarce będzie najprawdopodobniej dość istotnie różna. Można stwierdzić, że dostępne najbardziej aktualne oszacowania ilości odpadów komunalnych (i polimerów w nich zawartych) niewiele mają wspólnego w układzie chwilowym (bilanse roczne) z ilością polimerów zasilających gospodarkę (od strony produktu wytwarzanego w przemyśle chemicznym w dziale EKD-24 – polimery pierwotne). Za bardziej wiarygodne można uznać starsze oszacowania według KPGO-2002.

#### UPROSZCZONE MODELE BILANSOWE

Dla uzyskania akceptowalnych wyników analizy bilansowej, zwłaszcza w układzie prognozowanym, niezbędne wydaje się rozpatrzenie zależności bilansowych w szeroko pojętym obszarze produkcji, przetwórstwa i użytkowania materiałów polimerowych. Istnieją bowiem grupy polimerów wykorzystywane gospodarczo, których odzysk lub recykling (materiałowy, energetyczny, surowcowy) będą w praktyce niewykonalne technicznie i całkowicie nieuzasadnione ze względów ekonomicznych. Łańcuch przemian polimerów jest z punktu widzenia potrzeb i możliwości bilansowych znacznie

lepiej zdefiniowany w obszarze produkcji i przetwarzania polimerów pierwotnych, niż w tzw. obszarze „downstream” — produkcji wyrobów z tworzyw polimerowych i gospodarczego ich wykorzystania. Przyczynę tego faktu stanowi szeroki obszar zastosowań, obejmujący w dużym stopniu użytkowanie „poza tworzywowe” (branże pokryć powierzchniowych, farb i lakierów, klejów oraz kitów, żywic i laminatów, a także np. włókiennictwo, meblarstwo, motoryzacja). Odpady z tych branż, jak również odpady obejmujące odpowiednie wyroby z sektora konsumpcji, nie są bowiem klasyfikowane jako odpady z tworzyw bądź odpady polimerowe, aczkolwiek zawierają materiały polimerowe w różnej postaci. Szybkie, przybliżone oszacowania strumieni materiałowych polimerów zużytych (odpadowych) w układzie statycznym (tj. krótkookresowym) opierają się najczęściej na wnioskach z obserwacji podstawowych zależności wielkości strumieni w łańcuchu przemian polimerów w ujęciu rocznym. Analiza opublikowanych przez *PlasticsEurope* ([1, 2]) danych dotyczących krajów zaawansowanych gospodarczo (UE/Niemcy) wskazuje na znaczny stopień akumulacji polimerów w gospodarce, w bilansach rocznych. Na podstawie zależności między produkcją i zużyciem polimerów a ilością odpadów opuszczających rynek konsumenta, po analizie danych opublikowanych przez *PlasticsEurope* (d. APME czyli Association of Plastics Manufacturers in Europe), można przyjąć, że ilość powstających odpadów polimerowych w gospodarce ewentualnie uprzemysłowionej wynosi 58–63 % rocznego zużycia wewnętrznego polimerów pierwotnych w przetwórstwie.

Można założyć, że odpady polimerowe stanowić będą w Polsce podobną jak w UE ilość podanego w tabeli 2 zużycia polimerów, opartego na dokonanej ocenie wielkości krajowego rynku polimerów w układzie aktualnym i prognozowanym.

firmy Consultic [3, 4], wykonywanych na rzecz niemieckiego przemysłu chemicznego w latach 2003–2007, gdzie dość szczegółowo analizuje się poszczególne strumienie bilansowe polimerów w obszarze ich występowania w gospodarce, z uwzględnieniem struktury zużycia w poszczególnych gałęziach przetwórstwa i wykorzystania. Takie podejście lepiej tłumaczy różnice między obszarem produkcji i przetwórstwa, a sferą użytkowania i końca eksploatacji. Nadal jednak, do oceny ilościowej odpadowych strumieni polimerów wykorzystuje się koncepcję wspomnianych bilansów statycznych (rocznych). Określone szczegółowo i wyrażone w procentach udziały poszczególnych polimerów w odrębnych zastosowaniach ułatwiają ocenę przydatności do recyklingu, a także dokonanie dość dokładnych oszacowań, w szczególności w odniesieniu do polimerów o „krótkim czasie życia” w gospodarce. Przedstawione przez firmę Consultic ogólne zależności bilansowe wskazują na możliwość pominięcia w bilansie pewnych strumieni, które nie dają się sklasyfikować jako reprezentatywne odpady polimerowe, gdyż zostały przetworzone w produkty konsumpcyjne (o różnym „czasie życia”) wychodzące już z obszaru gospodarki, takie jak np. odpady włókiennicze, budowlane (gruz, zużyte tynki, inne pokrycia powierzchniowe i odpady remontowe), odpady wielkogabarytowe (meble, duże wyroby typu artykułów gospodarstwa domowego — AGD), odpady z przemysłów przetwórstwa drewna oraz farb i lakierów, odpady z sektora motoryzacji (wraki samochodowe, ogumienie) itp. W przypadku tego typu zastosowań w gospodarce, polimery w nich zawarte będą trudne bądź niemożliwe do recyklingu. Pozwala to na dokonanie następujących istotnych ograniczeń w obszarze bilansowym:

— Większość zużycia występujących w tabeli 2 „innych polimerów i żywic” dotyczy zastosowań, które można określić jako „poza tworzywowe”. W warunkach

**T a b e l a 2.** Wielkość (w latach 2005–2008) i bazowa prognoza wzrostu zużycia polimerów (w 10<sup>6</sup> kg/r.) w Polsce do 2020 r.

**T a b l e 2.** The consumption level (in the years 2005–2008) as basis for prognosis (in thousand tons) for rise in polymer consumption in Poland to the year 2020

Typ polimeru / Rok	2005	2006	2007	2008	2010	2015	2020
Masowego stosowania	1717,7	1927,5	2199,9	2157,9	2367,3	2936,5	3505,7
Inżynieryjne i konstrukcyjne	107,9	130,7	169,8	177,8	169,6	220,0	270,3
Poliuretany (PUR)	130,4	142,1	172,6	172,3	175,6	215,5	255,1
Inne polimery i żywice	451,0	498,5	868,3	859,4	784,0	1027,9	1272,1
Superabsorbenty poliakrylowe (SAP)	15,3	12,4	14,8	14,6	15,0	17,5	21,0
RAZEM	2422,3	2711,2	3425,4	3382,0	3511,5	4417,4	5324,2

Szacowanie wielkości strumienia odpadów polimerowych na podstawie powyższego zestawienia omawianego zużycia byłoby jednak niezbyt wiarygodne, zwłaszcza jeśli miałyby dotyczyć poziomu dostępności polimerów do procesów recyklingu. Bardziej prawidłowe wydaje się ujęcie problemu zaprezentowane w raportach

gospodarki UE szacuje się mianowicie, że ok. 2/3 tych polimerów jest zużywane poza sektorem przetwórstwa tworzyw.

— Zdecydowana większość kauczuków i gumy jest przetwarzana w branży oponiarskiej i w warunkach UE istnieją dość dobrze zorganizowane systemy zagospoda-

rowania tego typu odpadów. W typowych zastosowaniach „tworzywowych” udział kauczuków jest mały (<5 %, w zależności od warunków lokalnych).

– Poliuretany, poza zastosowaniami w przemyśle materiałów powłokowych, klejów i uszczelnień, są powszechnie stosowane w meblarstwie, motoryzacji i w sektorze AGD (pianki miękkie i sztywne) oraz w produkcji obuwniczej. Ich ewentualny recykling (dość trudny technologicznie ze względu na skład chemiczny polimeru) jest możliwy dopiero po wyodrębnieniu z innych odpadów (np. odpadów wielkogabarytowych takich jak meble). Zużycie PUR w zastosowaniach „poza tworzywowych” wynosi w warunkach UE 50–60 % (przeciętnie 56,5 %); dominują tu budownictwo, motoryzacja i meblarstwo.

– Polimery akrylowe – powszechnie stosowane w produkcji farb, kitów, szpachli, pobiałek, mas lejnych i tynków budowlanych – można uznać za słabo przydatne do recyklingu (nie istnieją np. technologie wyodrębniania polimeru z gruzu budowlanego). W innych zastosowaniach (np. w wyposażeniu łazienek, gdzie polimer stanowi tylko część kompozycji stosowanych w budowie wanien, umywalek, kabin prysznicowych itp.) recykling tworzyw akrylowych można uznać za mało prawdopodobny. A właśnie materiały powłokowe, środki wiążące i budowa łazienek to kierunki zużycia ok. 90 % poliakrylanów. Źródło odpadów w zastosowaniach krótkotrwałych stanowią przede wszystkim superabsorbenty akrylowe, a dominuje tu produkcja środków higieny.

Mniejszym, lecz szybko i konsekwentnie rosnącym obszarem potencjalnej dostępności bilansowej odpadów jest grupa polimerów inżynierskich, mniej jednak dogodnych do recyklingu ze względu na sposób ich występowania w wyrobach konsumpcyjnych; wyrób końcowy obejmuje bowiem detale wykonane z różnych polimerów i np. w samochodach, oprócz wcześniej wymienionej gumy i poliuretanów, występują detale wykonane z PA, poliwęglanów, poli(tereftalanu butylenu), poliacetali, PP, PVC, PE, ABS). Polimery inżynierskie charakteryzują się dość zróżnicowanym „czasem życia” w gospodarce,

zależnym od zastosowań. Najczęstszymi przypadkami są okresy 3–5 lat (różne wyroby AGD, elektronika, informatyka), 6–10 lat (elektrotechnika, wyposażenie mieszkań) lub 12–15 lat (motoryzacja).

W związku z powyższymi ograniczeniami, w skorygowanym bilansie można przyjąć następujące założenia:

– zastosowania tworzywowe obejmują ok. 1/3 zużycia wiersza „inne polimery i żywice”,

– strumień odpadów pochodzących z kauczuków i gumy (jako nieznaczny w porównaniu z innymi) może zostać pominięty w oszacowaniach,

– strumień PUR w zastosowaniach tworzywowych należy zmniejszyć do poziomu ok. 0,435 wielkości zużycia,

– obszar bilansowy strumienia poliakrylanów można ograniczyć do superabsorbentów poliakrylowych (SAP).

Po dokonaniu powyższych ograniczeń obszaru bilansowania, najistotniejszych udziałów strumieni odpadowych materiałów polimerowych należy poszukiwać przede wszystkim w obszarze polimerów masowego zastosowania, tj. PE, PP i kopolimery propylenu, PVC, PS i PET. Poza PVC i piankowym PS (w zastosowaniach, jako materiały do izolacji cieplnej w budownictwie), większość ww. polimerów charakteryzuje się krótkim czasem życia w gospodarce wynoszącym ok. 1–2 lat w większości zastosowań, a w sektorze opakowań [dominujący segment zastosowań PET (>90 %), PE-LD/PE-LLD (>75 %), PE-HD (>53 %), PP i PS (ok. 50 %)] – krócej niż 1 rok. Z rozważań bilansowych należy także wyeliminować PET w zastosowaniach włókienniczych. Po uwzględnieniu wszystkich ograniczeń obszaru bilansowania, skorygowane oszacowania krajowego zużycia polimerów i prawdopodobnej wielkości strumienia nadających się do recyklingu odpadów polimerowych są przedstawione w tabeli 3.

Pozycja „Razem” jest tam również podstawą oszacowania wielkości maksymalnego strumienia odpadów pod warunkiem przyjęcia (mało realnego) założenia, że przetworzone w gospodarce w ciągu roku polimery w tym samym roku stają się dobrem odpadowym. Skory-

**T a b e l a 3.** Zużycie (w 10<sup>6</sup> kg/r.) polimerów w zastosowaniach „tworzywowych” w Polsce w latach 2005–2008 wraz z prognozą do 2020 r. i oszacowanie strumienia odpadów do recyklingu

**T a b l e 3.** Consumption (in thousand tons) of polymers in applications in Poland in the years 2005–2008 and the prognosis to 2020 and the estimated recyclable waste output

Typ polimeru / Rok	2005	2006	2007	2008	2010	2015	2020
Masowego zastosowania	1717,7	1927,0	2199,9	2157,9	2367,3	2936,5	3505,7
Inżynierskie	107,9	130,7	169,8	177,8	169,6	220,0	270,3
PUR (zweryfikowane)	51,4	56,0	68,0	67,9	69,2	84,9	100,5
Inne polimery i żywice	150,6	161,9	275,3	272,4	248,5	325,8	403,2
Superabsorbenty poliakrylowe (SAP)	15,3	12,4	14,8	14,6	15,0	17,5	21,0
Razem	2042,9	2288,0	2727,8	2690,6	2869,6	3584,7	4300,7
Odpady szacunkowo (0,605*) × pozycja „Razem”	1235,9	1384,2	1650,3	1627,8	1736,1	2169,7	2601,9

\* Poziom minimalny – polimery nadające się do recyklingu w zastosowaniach krótkotrwałych.

gowana wielkość strumienia („Odpady szacunkowo”) podaje natomiast realną wielkość strumienia odpadów nadających się do recyklingu według współczynnika korygującego reprezentatywnego dla gospodarki UE (0,605 wielkości bazowego zużycia rocznego, po korekcie na akumulację w obszarze dóbr konsumpcyjnych). Bilans zużycia polimerów i ilość odpadów oszacowana na podstawie uzyskanych w ten sposób danych chwilowych (w układzie bilansów rocznych) daje więc względnie obiektywne wyniki jedynie w odniesieniu do polimerów o „krótkim czasie życia” w gospodarce. W związku z tym, rzetelna ocena wielkości strumienia odpadów potencjalnie przeznaczonych do procesów recyklingu dotyczy przede wszystkim segmentu opakowań z tworzyw sztucznych. Dla oszacowania wielkości pozostałej części strumienia niezbędny jest rachunek retrospektywny uwzględniający — na podstawie bilansów z lat wcześniejszych — możliwe ilości odpadów materiałów tworzywowych o dłuższych czasach życia.

#### BILANS ŁAŃCUCHA PRZEMIAN POLIMERÓW — MODEL ZAAWANSOWANY

Uzyskanie wiarygodnego bilansu polimerów odpadowych stanowiących potencjalny wsad surowcowy do procesów recyklingu wymaga możliwie dokładnego określenia bilansów ich pozyskania. W istocie — w odniesieniu do zastosowań o „średnim” i „długim” czasie życia rozważanego polimeru w gospodarce — są one w dużej części „projekcją z przeszłości”. W związku z powyższym, ostateczną koncepcję bilansową oparliśmy na rezultatach analiz „czasów życia” poszczególnych polimerów w różnych, reprezentatywnych zastosowaniach a także na rezultatach oszacowań ilości powstających odpadów na podstawie bilansów dynamicznych, uwzględniających „zaszłości” z okresów wcześniejszych. Taki model bilansowy umożliwia nie tylko dość wiarygodną ocenę wielkości poszczególnych strumieni różnych polimerów w rozmaitych zastosowaniach w układzie krótkookresowym, lecz także wykonanie prognozy zmian dostępności w latach późniejszych (w połączeniu z typowymi prognozami wzrostu zapotrzebowania rynku w odniesieniu do każdego z polimerów). Według ocen organizacji producentów (CEFIC, APME — *PlasticsEurope*) ok. 40 % polimerów wykorzystuje się w zastosowaniach „krótkookresowych” (1–2 lata) a ok. 60 % — w zastosowaniach „średnio” i „długookresowych” (3–30 lat). „Przeciętny czas życia” polimeru w gospodarce (w odniesieniu do ogółu polimerów) wynosi (w zależności od regionu geograficznego) 10–15 lat.

W związku z analizami przeprowadzonymi w trakcie generowania zweryfikowanego, statycznego modelu bilansowego, przyjęto, że analizie dynamicznej należy poddać tylko te polimery, które istotnie wpływają na bilans odpadów (jako odpadów „tworzywowych”). Są to:

— polimery masowego stosowania używane również jako tworzywa inżynieryjne i konstrukcyjne (PE, PP,

PVC, PS, PET) — główne strumienie w łańcuchu przemian surowce — odpady;

— podstawowe polimery inżynieryjne i konstrukcyjne w zastosowaniach „tworzywowych” [PA, PC, PMMA, POM, PBT, ABS/SAN / (terpolimer akrylonitryl / styren / akrylan)], ASA;

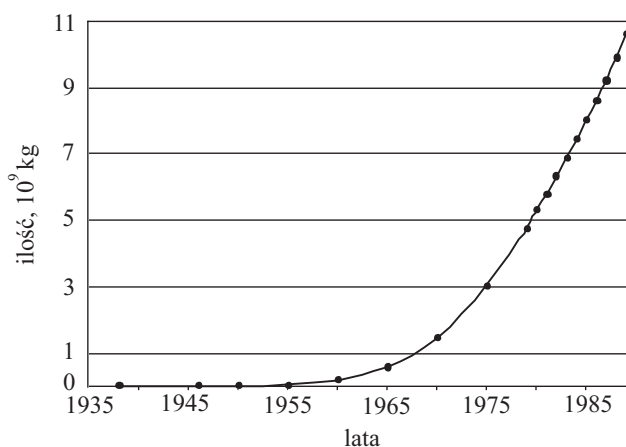
— PUR (strumień skorygowany do zastosowań „tworzywowych”);

— inne polimery i żywice (w tym polimery termoutwardzalne w zastosowaniach „tworzywowych” i inżynieryjnych);

— superabsorbenty poliakrylowe.

W miarę obiektywna obserwacja losu polimerów w gospodarce wymaga zastosowania bilansów dynamicznych, a wiarygodne oszacowania powinny uwzględniać zaszłości historyczne. Produkcja polimerów w Polsce została zapoczątkowana w 1938 r.; w chwili obecnej występują zmiany dynamiki wzrostu popytu na produkt, charakterystyczne dla drugiego okresu (szybkiego wzrostu) aproksymowanego zaadaptowanym równaniem Floyda opisującym „krzywe życia”.

W trakcie badań w ramach projektu PBZ-MNiSW-5/3/2006 dokonano nieformalnego podziału na okresy bilansowania produkcji, przetwórstwa i wykorzystania polimerów w gospodarce. Przyjęto, że strumień polimerów zużytych w Polsce do początku transformacji ustrojowej, czyli do roku 1989, można w istocie potraktować jako odpady zalegające na składowiskach. Skumulowaną ilość tych odpadów oszacowano z zastosowaniem bilansów dynamicznych (rys. 1).



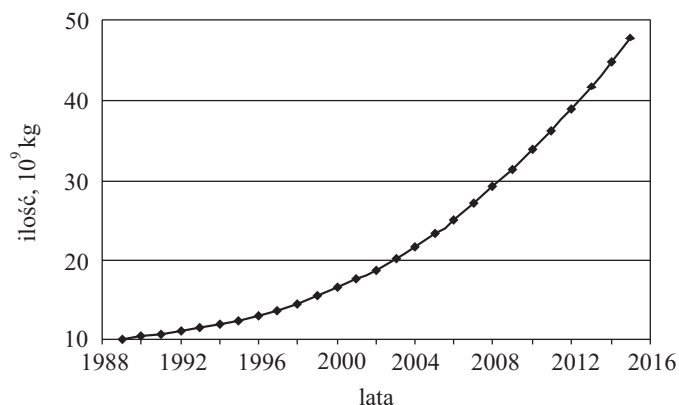
Rys. 1. Skumulowana ilość (w kg) odpadów polimerowych skierowanych na składowiska do początku transformacji ustrojowej (rok 1989) w Polsce

Fig. 1. Cumulative amount (in kg) of waste polymers directed for dumping at the beginning of the political transformation in Poland (1989)

Potencjalny wsad surowcowy do zagospodarowania w procesach recyklingu i/lub odzysku energii (ok.  $10,5 \cdot 10^9$  kg) zgromadzony do początku transformacji ustrojowej w Polsce wystarcza na ponad dwudziestoletnią

eksploatację instalacji o łącznej zdolności przerobowej  $500 \cdot 10^6$  kg/r. Jest to ładunek wsadu surowcowego już zdeponowany, który nie był brany pod uwagę w dotychczasowych bilansach i prognozach, lecz istniejący w rzeczywistości. W przypadku braku metod i chęci zagospodarowania będzie degradował się przez 400–600 lat czyli przeciętny okres naturalnego rozkładu odpadów polimerowych w środowisku.

Dla lepszego zaprezentowania możliwości, wynikających z zastosowania bilansów dynamicznych rozpatrzyliśmy bilans polimerów i odpadów polimerowych w okresie lat 1990–2015. Przyjęliśmy przy tym, że odpady zdeponowane na składowiskach do początku transformacji ustrojowej w 1989 r. nie wywierają wpływu na bilans późniejszy, poza zwiększeniem gromadzonego



Rys. 2. Skumulowana ilość (w kg) odpadów polimerowych przydatnych do procesów recyklingu w Polsce do 2015 r.

Fig. 2. Cumulative amount (in kg) of recyclable polymer wastes in Poland by the year 2015

strumienia o wielkość stałą. Założyliśmy dodatkowo, że wpływ ilości odpadów polimerów o „długich czasach życia” pochodzących ze zużycia przed okresem bilansowym na uzyskiwany wynik jest pomijalnie mały. Przyjęte przez nas zużycie polimerów (w zastosowaniach tworzywowych) wraz z prognozą do 2015 r. zawiera tabela 3 (pozycja „Razem”). Wyniki oszacowania (z uwzględnieniem zdeponowanej ilości odpadów polimerowych do

początku transformacji gospodarczej) wraz z prognozą do 2015 r. przedstawia rys. 2.

Analizowany przypadek długookresowego bilansu odpadów łącznie z prognozą pozwala na oszacowanie skumulowanej ilości odpadów w większości przydatnych do procesów recyklingu do 2015 r. na ok.  $47,8 \cdot 10^9$  kg. Umożliwiłoby to natychmiastowe uruchomienie w Polsce linii przetwórstwa odpadów polimerowych o łącznej zdolności ok.  $2,5 \cdot 10^9$  kg/r z perspektywą dwudziestoletniej stabilnej eksploatacji, wynikającej z istniejącego i perspektywicznego poziomu dostępności surowcowej.

Oszacowany poziom dostępności odpadów dotyczy przypadku, w którym potencjalny wsad surowcowy, w większości nadający się do recyklingu, jest zgromadzony w układzie silnie rozproszonych źródeł pozyskania (ponad 3000 składowisk). Rzeczywista dostępność będzie oczywiście znacznie mniejsza, lecz nie oznacza to mniejszej ilości odpadów, a jedynie trudność efektywnej eksploatacji wielu źródeł.

Omawiany tu bilans dynamiczny pozwala także na dokonanie oszacowań ogólnego strumienia odpadów polimerowych będącego zarazem maksymalnym poziomem dostępności surowca do recyklingu w ujęciu chwilowym (bilanse roczne). Można go określić na ok.  $2 \cdot 10^9$  kg w warunkach roku 2007, z nieuchronną perspektywą wzrostu do ok.  $2,3 \cdot 10^9$  kg już w bieżącym 2010 r. i przekroczenie poziomu 3 mln Mg w 2015 r. Uwzględnienie przy tym ok. dwukrotnie wyższej wartości opałowej polimerów niż węgla oznacza ilość równoważną  $(5-6) \cdot 10^9$  kg typowego krajowego węgla energetycznego, wystarczającą do zasilania elektrowni o mocy zainstalowanej ok. 2000–2400 MW w perspektywie 2015 r.

## PODSUMOWANIE

W niniejszym opracowaniu przedstawiono zagadnienia sporządzania bilansów odpadów polimerowych i dokonano porównania dotyczących Polski wyników oszacowań według przyjętych modeli bilansowych (szacunkowego skorygowanego i dynamicznego) z dostępnymi wariantami bilansów i prognoz (tabela 4), stwierdzając zadowalającą zgodność opracowanych modeli bilansowych (mimo różnych metod oraz sposobów bilansowa-

T a b e l a 4. Porównanie bilansów i prognoz ilości (w  $10^9$  kg/r.) odpadów polimerowych w Polsce

T a b l e 4. The comparison of real, approximated and dynamic balances as basis for prognosis of the amount (in million tons) of waste polymer production in Poland

Źródło / Rok	2000	2004	2005	2006	2007	2010	2014	2015	2016	2018
GUS	1,77	1,44	1,38	1,48	–	–	–	–	–	–
KPGO – 2002	1,96	–	2,33	2,42	–	3,44	4,27	–	4,58	–
KPGO – 2010	–	1,75	–	–	–	2,35	2,82	–	–	2,99
Model szacunkowy skorygowany <sup>*)</sup>	–	–	1,24	1,38	1,65	1,74	–	2,17	–	–
Model dynamiczny	1,05	1,51	1,61	1,78	2,04	2,36	2,95	3,10	–	–

<sup>\*)</sup> Por. tabela 3.

nia i wynikających z tego pewnych różnic). Rzeczywistą możliwością śledzenia przemian polimerów w odpad w rozmaitych segmentach rynku i w odniesieniu do różnych zastosowań daje przede wszystkim model dynamiczny. Wskazuje on również na skalę zaniedbania problemu zagospodarowania odpadów polimerowych w Polsce. Proste spełnienie wymagań dyrektyw Unijnych odnoszących się do poziomu recyklingu, mierzonego jako stopień zagospodarowania odpadów opakowaniowych pochodzących z produkcji bieżącej, wydaje się w obecnej sytuacji dalece niewystarczające. Na składowiskach w Polsce leży już ponad  $40 \cdot 10^9$  kg niezagospodarowanego surowca a ilość ta w perspektywie czasu będzie się zwiększać, jeśli nie zostaną podjęte zdecydowane działania zmierzające do rzeczywistego (a nie wyłącznie dyrektywnego) rozwiązania problemu.

*Praca wykonana w ramach PBZ-MNiSW-5/3/2006.*

#### LITERATURA

1. Raport *PlasticsEurope* „The Compelling Facts About Plastics 2007 — An analysis of plastics production, demand and recovery for 2007 in Europe”, published in October 2008.
2. Raporty *PlasticsEurope* (APME) „The Compelling Facts About Plastics 2003—2006”.
3. Raport Consultic „Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2007 — Kurzfassung”, publ. 21.11.2008.
4. Raport Consultic dla *PlasticsEurope* „Plastics Production, Consumption and Recycling Data for Germany 2003”, publ. 27.08.2004.

#### W kolejnym zeszycie ukaza się m.in. następujące artykuły:

- P. Luliński — Polimery ze śladem molekularnym w naukach farmaceutycznych. Cz. I. Podstawy procesu tworzenia śladu molekularnego. Zastosowanie w syntezie leków i technologii postaci leku
- P. Siwek, A. Libik, K. Twardowska-Schmidt, D. Ciechańska, I. Gryza — Zastosowanie biopolimerów w rolnictwie
- K. Pietrasik, O. Świątkowska, A. Kaim — Nowe dwufunkcyjne mediatory na podstawie pochodnych 4-amino-TEMPO regulujące przebieg rodnikowej polimeryzacji styrenu (*j. ang.*)
- E. Chmiel-Szukiewicz — Pianki poliuretanowe otrzymywane z oligoeteroli uzyskanych z 6-aminouracylu i węglanów alkilenowych (*j. ang.*)
- T. Pingot, M. Pingot, M. Zaborski — Sieciowanie kauczuku butadienowo-styrenowego w obniżonej temperaturze pod wpływem układów redoks
- Z. Hrdlicka, A. Kuta, J. Hajek — Mieszanki elastomerów termoplastycznych otrzymane z odpadowej gumy i polietylenu małej gęstości (*j. ang.*)
- S. Vasiliu, S. Racovita, V. Neagu, M. Popa, J. Desbrieres — Kompleksy polimer-metal na podstawie gelanu (*j. ang.*)
- B. Samujło, A. Rudawska — Modyfikacja polietylenu wodorotlenkiem glinu a jego swobodna energia powierzchniowa
- A. Karaszewska, J. Bucheńska — Antybakteryjne włókna poliestrowe zawierające jony srebra. Cz. II. Kinetyka uwalniania jonów srebra i wybrane właściwości modyfikowanych włókien
- B. Król, P. Król — Materiały powłokowe otrzymywane z kationomerów poliuretanowych modyfikowanych funkcjonalizowanym silseskwioxanem. Cz. II. Właściwości użytkowe
- L. Harri — Parametry sensytmetyczne płyt fotopolimerowych służących do wytwarzania form fleksodrukowych cyfrową metodą laserowo-fotochemiczną
- M. Żenkiewicz, J. Richert, A. Różański — Wpływ stopnia rozdmuchania na właściwości mechaniczne nanokompozytowej folii polilaktydowej (*j. ang.*)
- J. Ziobro, A. Marciniak — Zastosowanie narzędzi CAx w projektowaniu form wtryskowych
- K. Wilczyński, A. Lewandowski — Modelowanie przepływu tworzyw w procesie wytłaczania dwuślimakowego przeciwbieżnego. Cz. I. Modelowanie przepływu