

Przemysł tworzyw sztucznych – materiałów XXI wieku

Plastics industry – manufacturing materials for 21st century

KAZIMIERZ BORKOWSKI *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.4.158

Przedstawiono krótki rys historyczny tworzyw sztucznych, aktualne dane na temat ich światowej produkcji oraz zastosowania w gospodarce – ze wskazaniem najważniejszych dziedzin. Następnie omówiono różnorodność tych materiałów i sposoby ich klasyfikowania. Na przykładach wytwarzanych wyrobów pokazano zróżnicowanie metod przetwórstwa tworzyw sztucznych. Na zakończenie zaprezentowano dane dotyczące odzysku tworzyw sztucznych oraz przytoczono argumenty wskazujące na ich ważną rolę jako materiałów o ogromnym potencjale innowacyjnym dla przyszłego rozwoju gospodarki.

SŁOWA KLUCZOWE: tworzywa sztuczne, zastosowanie tworzyw sztucznych, recykling, odzysk energetyczny, technologie przetwórstwa tworzyw

This article presents basic facts on plastics industry including a short historical review of various plastics discoveries and quotes figures on current world production. Main applications of plastics are described. Variety of plastic types and different plastics classification systems are explained as well as different plastics processing methods with examples of products manufactured using those methods are shown. Finally, data on plastics waste recovery are commented and plastics role as a driver for innovative development of the economy in the nearest future is emphasized.

KEYWORDS: plastics, application areas of plastics, recycling, energy recovery, plastics processing methods

Tworzywa sztuczne należą do najmłodszych materiałów konstrukcyjnych. Pierwsze tworzywa powstały dopiero w drugiej połowie XIX w. W 1862 r. angielski chemik Alexander Parkes opatentował otrzymane z celulozy tworzywo sztuczne i nazwał je parkesine. Ten materiał z grupy tworzyw celulozowych nadawał się do przetwarzania prostymi metodami, a pierwsze zastosowanie znalazł w produkcji kul bilardowych (wcześniej wykonywanych z kości słoniowej) – pozwoliło to obniżyć koszty ich wytwarzania. Jednakże tworzywa sztuczne zaczęto stosować na masową skalę dopiero po wynalezieniu przez Leo Baekelanda w 1907 r. przemysłowej metody otrzymywania tworzywa, które nazwał bakelitem. Żywica powstała na skutek reakcji formaldehydu z fenolem (polikondensacji) z dodatkiem mączki drzewnej nadawała się do produkcji wyrobów metodą odlewania lub prasowania, natomiast po utwardzeniu materiał był podatny na obróbkę mechaniczną. Dobre właściwości mechaniczne w połączeniu z niską przewodnością elektryczną i odpornością chemiczną na wiele rozpuszczalników spowodowały, że bakelit stał się bardzo popularnym materiałem konstrukcyjnym, używanym przede wszystkim w elektrotechnice (ze względu na swe właściwości izolacyjne), ale także do produkcji wielu wyrobów użytkowych (np. radioodbiorników, telefonów i przyborów kuchennych).

Prawie wszystkie polimery, które obecnie są produkowane na skalę przemysłową, odkryto w pierwszej połowie XX w. np.: polichlorek winylu PVC (1912 r.), polistyren PS (1929 r.), polietylen niskiej gęstości LDPE (1933 r.), polimetakrylan metylu PMMA (1933 r.), politetrafluoroetylen (teflon) PTFE (1938 r.). Pełną listę przedstawia tabl. I.

TABLICA I. Tworzywa sztuczne w kolejności ich wynalezienia

Rok	Tworzywo sztuczne
1862	parkesine
1868	celuloid
1892	rayon (wiskoza)
1897	galalit
1907	bakelit – żywice fenolowe
1912	polichlorek winylu PVC
1913	polioctan winylu
1929	polistyren PS
1930	neopren
1932	polilaktid PLA
1933	polietylen niskiej gęstości LDPE
1934	melamina, polimetakrylan metylu PMMA
1935	poliamid PA
1937	poliuretan PUR
1938	politetrafluoroetylen PTFE (teflon)
1941	poli(fluorek winylidenu) PVDF, poli(tereftalan etylenu) PET
1943	silikony
1946	terpolimer akrylonitryl-butadien-styren ABS
1952	polioksymetylen (poliacetal) POM
1955	polietylen wysokiej gęstości (polietylen niskociśnieniowy) HDPE
1956	poliwęglan PC
1957	polipropylen PP
1964	poli(eter fenylenu) PPE
1965	poliaramidy, polisulfon PSU, polimery ciekłokrystaliczne LCP, poli(eteroeteroketon) PEEK
1970	polisarczek fenylenu PPS, poliimidy
po 1980	polihidroksyalkanolany PHA, polihidroksymaślan PHB, tworzywa oparte na skrobi

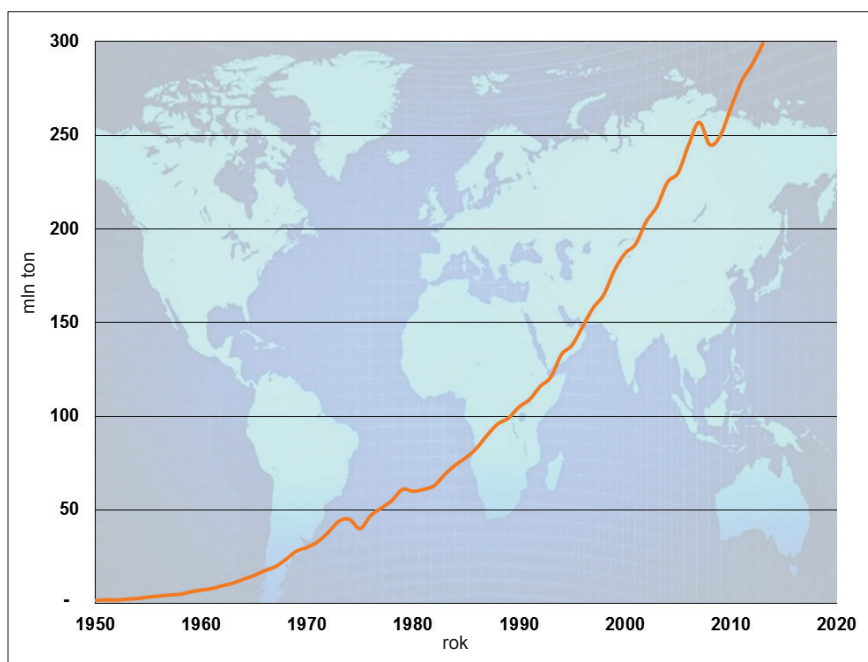
Produkcja i zużycie tworzyw sztucznych

Od lat 60. notuje się gwałtowne przyspieszenie produkcji i zużycia tworzyw sztucznych (rys. 1) – głównie za sprawą ich masowego wdrażania w licznych sektorach gospodarki. Zużycie tworzyw rosło w bardzo szybkim tempie, aby w 2013 r. osiągnąć poziom ok. 300 mln t.

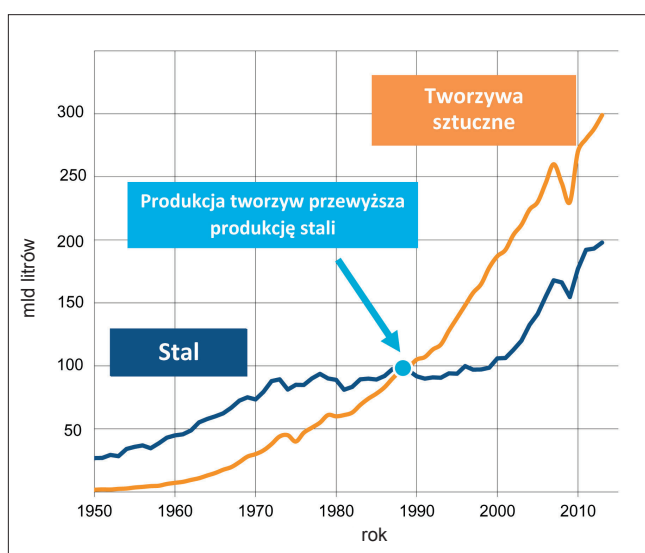
Obecnie liderem produkcji tworzyw sztucznych na świecie są Chiny (ok. 25% światowej produkcji), które kilka lat temu wyprzedziły w tej dziedzinie Europę i kraje bloku NAFTA (po ok. 20% światowej produkcji).

Interesujące jest również porównanie wzrostu produkcji i zużycia tworzyw w odniesieniu do innego ważnego materiału konstrukcyjnego, jakim jest stal. Otóż pod koniec lat 80. ub. w. produkcja tworzyw sztucznych przekroczyła – w ujęciu objętościowym (tj. nie pod względem masy, lecz widocznej ilości, czyli objętości materiału) produkcję stali (rys. 2).

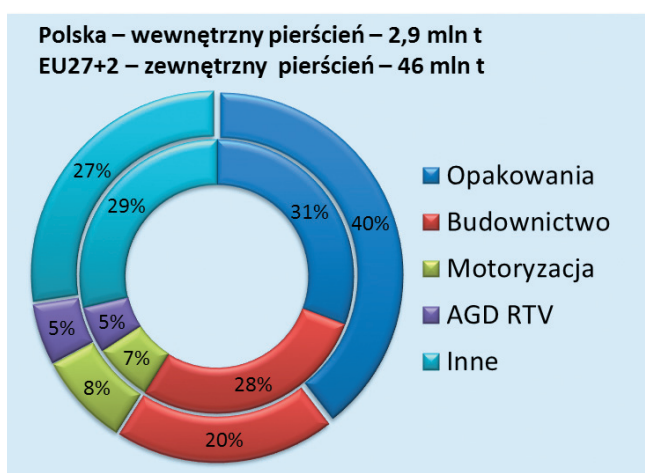
* Dr inż. Kazimierz Borkowski (info.pl@plasticseurope.org) – Fundacja PlasticsEurope Polska



Rys. 1. Światowa produkcja tworzyw sztucznych [1]



Rys. 2. Porównanie objętości produkowanych tworzyw sztucznych z klasycznym materiałem – stalą [2]



Rys. 3. Zużycie tworzyw sztucznych w Polsce według zastosowań (2013 r.) [1]

W naszym kraju zużywa się ponad 2,9 mln t tworzyw sztucznych rocznie (ok. 75 kg na osobę) – pod tym względem jesteśmy szóstym rynkiem w Unii Europejskiej. Tempo wzrostu zużycia tworzyw w Polsce jest wyraźnie wyższe od średniej unijnej.

Największa ilość tworzyw – ponad 31% – trafia do przemysłu opakowań (przeznaczonych do żywności, wody i napojów, a także towarów nieżywnościowych) oraz – 28% – do budownictwa (materiały izolacyjne, rury wodociągowe i kanalizacyjne, kable, okna). Przemysł samochodowy to kolejne 7%, a elektryczny i elektroniczny 5% (rys. 3).

Tworzywa sztuczne jako materiał konstrukcyjny

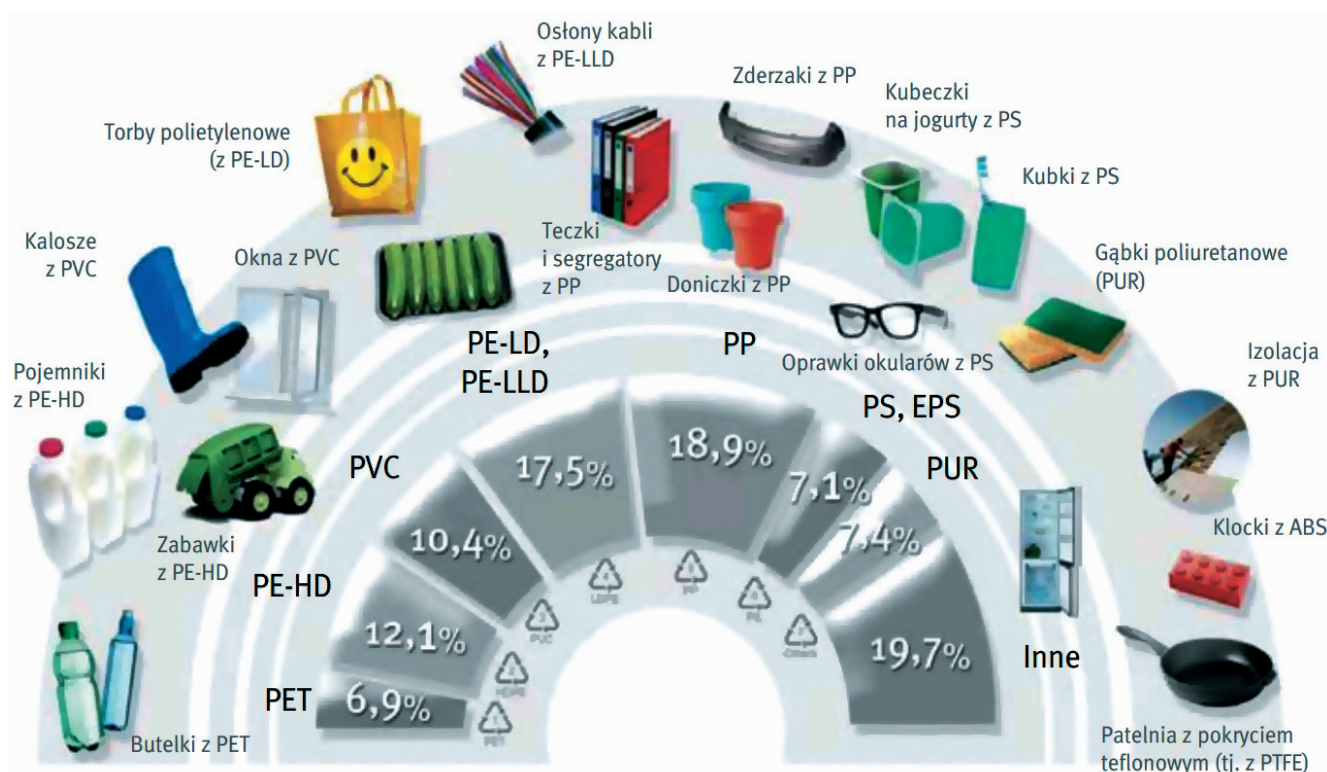
Pojęcie tworzyw sztucznych (tworzyw polimerowych) jest bardzo szerokie. Tą nazwą określa się materiały, których podstawowym składnikiem są polimery, czyli wielocząsteczkowe związki chemiczne otrzymane w przemysłowych procesach polimeryzacji.

Obecnie w powszechnym zastosowaniu, w różnych dziedzinach życia i gospodarki, znajduje się ponad setka różnych (pod względem chemicznym) polimerów. Pożądane dla danego zastosowania właściwości fizykochemiczne i mechaniczne materiałów polimerowych uzyskuje się przez dodatek specjalnych substancji pomocniczych albo łączenie różnych typów polimerów ze sobą lub z innymi materiałami konstrukcyjnymi, np.: z włóknami węglowymi (kompozyty polimerowe).

Przyczynami tak szybkiego wzrostu zastosowania tworzyw sztucznych są: stosunkowo niska cena, łatwość formowania i wyjątkowe właściwości – np. odporność na korozję i chemikalia, niska przewodność elektryczna i cieplna, wytrzymałość, odporność na uderzenia i na większość chemikaliów, niski ciężar właściwy, możliwość powtórnego przerobu w drodze recyklingu.

Tworzywa sztuczne można dzielić według różnych kryteriów, tj. ze względu na:

- **strukturę chemiczną:**
 - poliolefiny (PE, PP),
 - polichlorek winylu (PVC),
 - polistyren (PS) i inne tworzywa styrenowe (ABS, SAN),
 - poliamidy (PA),
 - poliestry (np. PET),
 - poliuretany (PU),
- **zachowanie podczas przetwarzania:**
 - tworzywa termoplastyczne (inaczej termoplasty lub plastomery),
 - tworzywa utwardzalne (inaczej duroplasty lub duro-mery),
- **rynek (ilości, ceny):**
 - tworzywa masowe – polietyleny wysokiej i niskiej gęstości (HDPE, LDPE), polipropylen (PP), polichlorek winylu (PVC), poli(tereftalan etylenu) (PET) oraz polistyren (PS), łącznie z polistyrenem do spieniania,
 - tworzywa specjalistyczne (konstrukcyjne, techniczne) – tworzywa, które ze względu na bardzo dobre właściwości mechaniczne i wysoką odporność termiczną są stosowane jako materiały konstrukcyjne urządzeń i maszyn, np.: kopolimer akrylonitryl-butadien-styren (ABS), kopolimer akrylonitrylu i styrenu (SAN), poliamidy (PA), politetrafluoroetylen (PTFE), polioksometylen (POM), poliwęglan (PC), polimetakrylan metylu (PMMA),
 - tworzywa wysokospecjalistyczne (często projektowane pod konkretne zastosowanie) – tworzywa wyróżniające się



Rys. 4. Szeroka gama zastosowań tworzyw sztucznych [2]

wyjątkowymi właściwościami mechanicznymi i temperaturowymi, używane w bardzo wymagających warunkach, np.: aramidy (kevlar, nomex), poliimidy (PI), poli(eteroeteroketony) (PEEK).

Na rys. 4 pokazano przykłady typowych zastosowań niektórych popularnych tworzyw sztucznych.

Jak widać, tworzywa sztuczne mogą mieć różnorodny skład chemiczny i różną budowę chemiczną, a ponadto ich właściwości można modyfikować w szerokim zakresie przez zastosowanie rozmaitych dodatków: modyfikatorów wytrzymałości (np. udarowości), plastyfikatorów, środków uniepalniających, barwników i pigmentów, stabilizatorów UV, lubrykantów (wewnętrznych środków smarnych), napelnaczy, włókien szklanych i innych dodatków zwiększających odporność mechaniczną.

Przetwórstwo tworzyw sztucznych

Pod względem użytkowym tworzywa sztuczne można podzielić na:

- **duroplasty** – twarde i nietopliwe, o wysokiej odporności mechanicznej, służące jako materiały konstrukcyjne – inaczej nazywane sztucznymi metalami. Niektóre duroplasty zastępują też materiały ceramiczne,
- **termoplasty** – mniej sztywne od duroplastów, łatwotopliwe i plastyczne, dzięki czemu można je przetwarzać za pomocą wtrysku lub wytłaczania, uzyskując bardzo skomplikowane kształty. W niektórych zastosowaniach wyroby z termoplastów zastępują drewno, a niekiedy również metal (np. na obudowy do maszyn i urządzeń, elementy wyposażenia domowego),
- **elastomery** – na skutek rozciągania lub ściskania znacząco zmieniają swój kształt, ale po odjęciu siły wracają do poprzednich wymiarów. Materiały te niemal całkowicie zastąpiły kauczuk naturalny i znalazły wiele nowych zastosowań niedostępnych dla zwykłego kauczuku.

Za tą różnorodnością tworzyw sztucznych idą też różne metody przetwarzania. Najważniejsze z nich, wraz z przykładami formowanych wyrobów, zamieszczono w tabl. II.

TABLICA II. Metody przetwórstwa tworzyw sztucznych i przykłady formowanych wyrobów

Metoda przetwórstwa	Wyroby
wytłaczanie	profile, rury, płyty, folie osłony kabli i profili
wytłaczanie z rozdmuchem	wyroby puste w środku: butelki, pojemniki
kalandrowanie	folie, taśmy, panele, płyty
wtryskiwanie	kształtki, np. pojemniki, pokrywy, szczoteczki do zębów, skrzynki na butelki, naczynia, koła zębate, obudowy
prasowanie	kształtki, płyty, korpusy, profile, laminaty, płyty drukowane, gniazdko i wtyczki
formowanie rotacyjne	duże zbiorniki, kubły na śmieci, beczki, zbiorniki paliwa
spienianie	bloki, płyty, taśmy, kształtki, różnego typu pianki
odlewanie	folie, bloki, kształtki, powłoki
termoformowanie	kubki, opakowania, wanny, kadłuby łodzi, różne wyroby o małej grubości ścianki i dużych rozmiarach, obudowy, meble
wytłaczanie powlekające i wylanie	powlekanie tkanin, papieru, drewna i blach
odlewanie i zalewanie	różnego typu kształtki, hermetyzacja wyrobów
odlewanie ze spienianiem	wypełnienia pustych przestrzeni, powłoki, duże kształtki

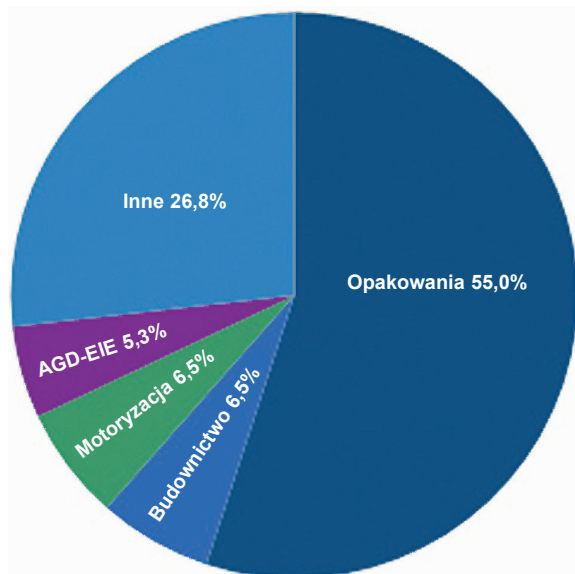
Recykling i odzysk odpadów tworzyw sztucznych

Odpady tworzyw sztucznych stanowią co najmniej 12÷13% masy wszystkich odpadów komunalnych, jednak z uwagi na stosunkowo małą gęstość są bardziej widoczne w porównaniu z innymi materiałami i odpadami. Szacuje się, że w Polsce powstaje ok. 1,5 mln t odpadów tworzyw sztucznych. Niestety, efektywne zagospodarowanie tych odpadów wciąż stanowi nierozwiązany problem. W 2012 r. tylko ok. 24% poddano recyklingowi mechanicznemu, ok. 17% odzyskowi energii, a pozostałe 59% trafiło na składowiska



odpadów. Biorąc pod uwagę średnią europejską (recykling – 26%, odzysk energetyczny – 36%, składowanie – 38%), Polska ma w tej dziedzinie dużo do nadrobienia. Wdrażana obecnie nowa polityka zagospodarowania odpadów daje nadzieję, że niedługo nastąpi przyspieszenie w efektywnym odchodzeniu od składowania odpadów tworzyw sztucznych.

Największą grupę stanowią odpady opakowaniowe – 55% (rys. 5). Stopień odzysku tej grupy odpadów jest największy i w 2012 r. wyniósł 64,2%, z czego 39,2% stanowił recykling mechaniczny. Znacznie mniej odzyskuje się odpadów z budownictwa (ok. 17%) oraz ze zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (ok. 15%). Najmniej, bo zaledwie 4% odpadów tworzyw sztucznych, odzyskiwanych jest z samochodów i pojazdów wycofanych z eksploatacji.



Rys. 5. Źródła pochodzenia odpadów tworzyw sztucznych w Polsce [1]

Wykorzystanie wartości tworzyw sztucznych to bardzo ważny aspekt racjonalnej gospodarki zasobami. Zawrótce do niej odpadów (gospodarka o obiegu zamkniętym) może polegać na ponownym wykorzystaniu materiału w ramach procesów recyklingu mechanicznego, gdzie z odpadów wytwarza się nowe wyroby, bądź na odzyskaniu energii zawartej w odpadach. Z uwagi na bardzo wysoką kaloryczność (rzędu 40 MJ/kg) odpady tworzyw sztucznych są doskonałym zasobem energii, gdyż frakcje odpadów, które nie nadają się do recyklingu (np. są mocno zabrudzone lub zmieszane), mogą być z powodzeniem wykorzystane do produkcji energii elektrycznej i ciepłej, co w konsekwencji zmniejsza zapotrzebowanie na paliwa ze źródeł nieodnawialnych (np. na węgiel czy gaz ziemny).

Mając to na uwadze, europejska branża tworzyw sztucznych rozwija program „Zero plastics to landfills”, promujący całkowite odejście (do 2025 r.) od składowania odpadów tworzyw sztucznych i wskazujący, że w całej Europie możliwe jest pełne zagospodarowanie tych odpadów pod warunkiem rygorystycznego i pełnego wdrożenia unijnego prawa odpadowego. W tym kontekście szczególnie ważne jest wprowadzenie w UE zakazu składowania recyklowalnych i palnych odpadów, o co apeluje cała branża tworzyw sztucznych.

Przyszłość tworzyw sztucznych

Jaka przyszłość czeka tworzywa sztuczne w najbliższych kilkunastu czy kilkudziesięciu latach? Analizując rozwój branży tworzyw sztucznych na przestrzeni ostatnich 20÷30 lat i przyglądając się obszarom nasilenia badań z zakresu inżynierii materiałowej, wydaje się, że tworzywa sztuczne (lub szerzej: materiały oparte na polimerach) nadal będą

w centrum uwagi. Jako materiały, które idealnie nadają się do wdrażania nowych odkryć i idei naukowców, będą miały realny udział w rozwiązywaniu obecnych i przyszłych wyzwań ludzkości (nazywanych często megatrendami), takich jak:

- szybki wzrost ludności i zmiany demograficzne,
- globalizacja i urbanizacja,
- zmiany klimatu – globalne ocieplenie, braki energii,
- rewolucja w ochronie zdrowia i ochronie konsumenta,
- przyspieszenie zmian technologicznych.

W niektórych obszarach (omówiono je poniżej) dotychczasowe zastosowania tworzyw sztucznych, a także zastosowania będące dopiero przedmiotem badań rozwojowych, mogą się przyczynić do nowej rewolucji technologicznej.

Materiały polimerowe, zwłaszcza polimery przewodzące prąd, można wykorzystać w **urządzeniach elektronicznych**, np. w wyświetlaczach LED i OLED, bateriach i magazynach energii (superkondensatorach), biosensorach, ale przede wszystkim w ogniwach fotowoltaicznych opartych na polimerach. Już teraz znane są polimerowe ogniwa fotowoltaiczne o sprawności energetycznej 10% i większej. W połączeniu z bardzo taną metodą ich wytwarzania, np. wykorzystującą technikę druku, takie ogniwa mogą szybko zdobyć przewagę nad drogimi w produkcji ogniwami opartymi na tradycyjnych materiałach półprzewodnikowych (krzemie czy arsenku galu). Dodatkową opcją mogą być polimerowe ogniwa fotowoltaiczne naniesione (nadrukowane) na elastyczną folię polimerową, co zwiększy mobilność tych urządzeń oraz sprawi, że ich montaż będzie łatwy, szybki i tani.

Kontynuowane będzie doskonalenie istniejących materiałów polimerowych z wykorzystaniem nowych zdobyczy inżynierii materiałowej, takich jak np. nanomateriały. **Modyfikacje polimerów nanomateriałami** i innymi dodatkami pozwalają na otrzymanie nowych, bardziej wytrzymałych kompozytów, znajdujących zastosowanie w najbardziej innowacyjnych dziedzinach przemysłu – w **przemśle lotniczym i samochodowym czy medycynie**.

Z uwagi na fakt, że ponad 99% produkowanych obecnie tworzyw sztucznych wytwarza się z surowców nieodnawialnych (ropy naftowej i gazu ziemnego), już teraz dąży się do poszukiwania wydajnych metod otrzymywania tych materiałów z dostępnych surowców odnawialnych (biomasy). Wiodące wysokie tempo wzrostu **tworzyw „bio”** wskazuje, że za kilkanaście lat może to być ważny segment przemysłu tworzyw sztucznych.

Interesującym pomysłem, który rozwiązałby dwa problemy jednocześnie, jest **wytwarzanie tworzyw sztucznych z dwutlenku węgla**. Po pierwsze, pozwoliłoby to osłabić zależność produkcji tworzyw od ropy naftowej, a po drugie – przyczyniłoby się do zmniejszenia efektywnej emisji gazów cieplarnianych.

Przytoczone przykłady pokazują, że przyszłość tworzyw sztucznych jest niezagrażona. Materiały te jeszcze długo będą się przyczyniać do oszczędności energii i innych zasobów, a przez swój duży potencjał innowacyjny i oferowanie nowych rozwiązań technologicznych – również do polepszenia jakości codziennego życia.



LITERATURA

1. Materiały PlasticsEurope Market Research Group, 2014.
2. Materiały PlasticsEurope, 2013, 2014.