

# POLIMERY

MIESIĘCZNIK POŚWIĘCONY CHEMII, TECHNOLOGII I PRZETWÓRSTWU POLIMERÓW

ANDRZEJ K. BŁĘDZKI<sup>\*)</sup>, KRZYSZTOF GORĄCY<sup>\*\*)</sup>

## Instalacje do rozdziału odpadowych tworzyw sztucznych z opakowań<sup>\*\*\*)</sup>

### INSTALLATIONS TO SORT PACKAGING PLASTICS WASTES

**Summary** — Noncomminuted plastics wastes can be sorted manually or mechanically by using differences in optical, chemical, electrostatic, or temperature-dependent properties. Comminuted wastes can be sorted by using differences in density ("swim-drown" technique; hydrocyclone; centrifuge) or wettability, and electrostatic or chemical properties. Flowsheets are given. Three technical solutions are discussed, *viz.*, the „yellow bag” installation (Duales System Deutschland), constructed by Thyssen-Henschel and operated since January 1995; the hydrocyclone installation; and the centrifuge installation constructed by Rethman (Luenen) and operated since June 1996. Sorting is important for downstream processing of the recycle.

**Key words:** plastics wastes, sorting equipment, commercial sorting installations

Kluczowym etapem w przygotowaniu odpadów tworzyw sztucznych do dalszej przeróbki jest ich sortowanie. Jakkolwiek znane są technologie przetwórstwa nie rozdzielanych odpadów tworzyw sztucznych, pierwszeństwo daje się technologiom wykorzystującym odpady posortowane na poszczególne rodzaje tworzyw. Im bardziej bowiem czysty i homogeniczny jest surowiec, tym lepsza staje się jakość produktu oraz powtarzalność jego właściwości.

Sortowanie odpadów tworzyw sztucznych polega więc na rozdzielaniu mieszanin tworzyw w celu uzyskania możliwie czystych frakcji poszczególnych polimerów do dalszego przetwórstwa.

Mieszanie materiałów w trakcie sortowania rozdziela się według następujących właściwości fizyko-chemicznych:

- charakterystyki optycznej,
- zachowania się w różnej temperaturze,
- gęstości,
- zwilżalności,
- charakterystyki chemicznej,
- właściwości elektrostatycznych.

Wybór metody sortowania i dokładność sortowania zależą od bardzo wielu czynników. Do najważniejszych spośród nich zalicza się:

- źródło odpadów, ich postać, rodzaj i stopień zanieczyszczenia;
- liczbę rodzajów tworzyw i ich udział w odpadach;
- ilość odpadów;
- wymagania dotyczące właściwości produktu wytwarzanego z odzyskanych odpadów.

Wybór metody sortowania zależy również od rodzaju tworzyw, które trzeba rozdzielić (na ogół znany jest przynajmniej orientacyjny skład mieszaniny tworzyw)

<sup>\*)</sup> Uniwersytet w Kassel, Instytut Techniki Materiałowej, Moenchebergstrasse 3, 34-109 Kassel, Niemcy.

<sup>\*\*)</sup> Politechnika Szczecińska, Instytut Polimerów, ul. Pułaskiego 10, 70-322 Szczecin.

<sup>\*\*\*)</sup> Uaktualniony tekst referatu wygłoszonego podczas konferencji "Maszyny i urządzenia do recyklicacji tworzyw sztucznych", 16—17 listopada 1995 r., Przysiek k. Torunia.

oraz od wymaganej dokładności rozdziału. Nie bez znaczenia jest również związany ze sposobem sortowania nakład finansowy.

Dobra metoda rozdzielania tworzyw musi być prosta w zastosowaniu, szybka (wydajna), niezawodna (w wysokim stopniu niezależna od możliwych zaburzeń), tania oraz nie wymagająca ingerencji pracowników lub specjalnego wstępnego przygotowania mieszaniny. Poza tym potrzebne urządzenia nie powinny zajmować dużej powierzchni.

W przypadku odpadów tworzyw sztucznych z opakowań główne frakcje tworzą: polietylen, polipropylen, poli(chlorek winylu), polistyren i poli(tereftalan etyleny); dlatego też większość metod sortowania stosuje się do tych właśnie rodzajów polimerów. Problemy stwarzają przy tym bardzo zbliżone właściwości różnych tworzyw (np. gęstość). Dotyczy to przede wszystkim poliolefin, które stanowią największą część odpadów opakowaniowych, oraz PVC i PET.

#### SORTOWANIE NIE ROZDROBNIONYCH ODPADÓW TWORZYW SZTUCZNYCH

##### Sortowanie ręczne

Najprostszą metodą sortowania nie rozdrobionych odpadów tworzyw sztucznych — np. z odpadów komunalnych — jest sortowanie ręczne. W tej metodzie załoga sortuje ręcznie odpady przesuwające się na taśmach. Sortowanie następuje na podstawie indywidualnej oceny optycznej pracowników. Wydajność instalacji zależy od sprawności załogi (szybkości ruchów). Na jedną tonę tworzyw składa się ok. 70 000—100 000 opakowań, tyle więc ruchów ramion muszą wykonać pracownicy. Jeden pracownik jest w stanie wykonać w ciągu godziny 1 500—2 000 ruchów ramion.

Poważnym problemem w takich instalacjach są warunki pracy załogi, zwłaszcza zaś intensywne zapachy. W 1995 roku pracowało w Niemczech 11 000 osób w 300 sortowniach ręcznych. Niektórzy spośród pracowników skarżyli się na nudności, biegunki, kaszel i podwyższoną temperaturę. Oprócz tych dolegliwości możliwe są jeszcze infekcje przez drogi oddechowe i skórę, alergie na zarodniki grzybów, pleśni, ewentualnie wywoływanie raka przez toksyny z grzybów. Badania wykazały znaczne przekroczenie norm dopuszczalnych zawartości mikroorganizmów w powietrzu wdychanym przez pracowników. Ponadto istnieje możliwość skażeń ostrymi przedmiotami znajdującymi się w odpadach. Aby ograniczyć zakres chorób zawodowych, niezbędna jest automatyzacja procesu.

Metodą sortowania ręcznego można rozdzielać tworzywa od szkła, metali i papieru, jak również folie od butelek oraz od innych wyrobów z tworzyw. Sortowanie tworzyw tym sposobem znacznie ułatwia odpowiednie oznakowanie tworzyw. Dane techniczne przykłado-

wej instalacji do ręcznego sortowania odpadów podaje tabela 1.

**T a b e l a 1.** Dane techniczne instalacji do ręcznego sortowania odpadów

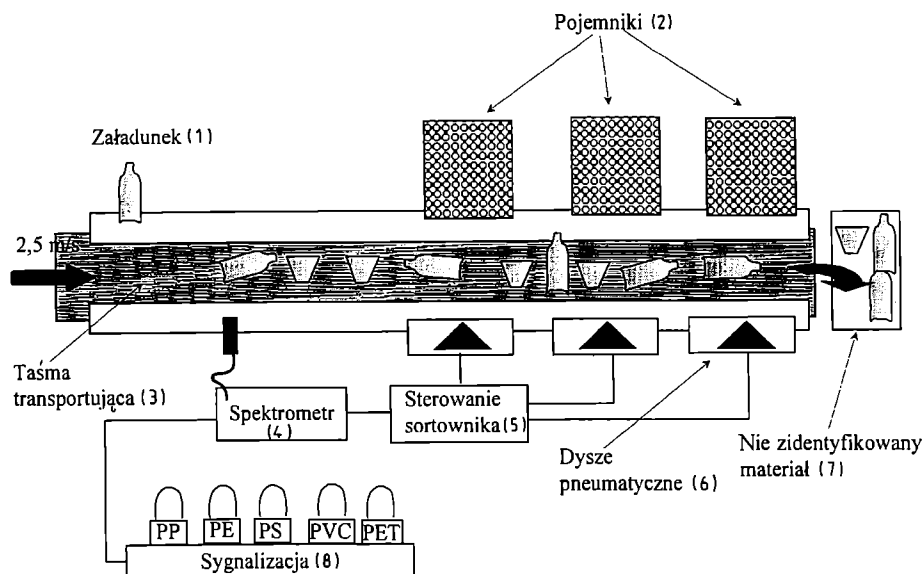
**T a b l e 1.** Technical data for a manual sorting installation

| Parametr                       | Wartość                                                                        |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Zapotrzebowanie powierzchni    | ok. 120 m x 50 m                                                               |
| Wysokość instalacji            | ok. 9 m                                                                        |
| Liczba transporterów           | 2                                                                              |
| Wydajność                      | ok. 100 t/dzień odpadów przemysłowych (1 zmiana)                               |
| Pozostałość                    | 20% mas.                                                                       |
| Moc zasilania                  | ok. 87 kW — instalacja do sortowania<br>ok. 65 kW — prasa (do prasowania beli) |
| Żałoga — liczba osób sortujący | 14                                                                             |
| rezerwa                        | 2                                                                              |
| nadzór zmiany                  | 1                                                                              |
| obsługa ładowarki              | 1                                                                              |
| obsługa podnośnika widłowego   | 1                                                                              |

##### Sortowanie według właściwości optycznych

Znacznie szybsze niż sortowanie ręczne jest automatyczne sortowanie tworzyw. Instalacje do sortowania automatycznego składają się w zasadzie z dwóch elementów: urządzenia szybko identyfikującego tworzywo przesuwające się na taśmie i urządzenia oddzielającego (mechanicznie lub pneumatycznie) rozpoznane tworzywo. Do identyfikacji tworzyw w sposób ciągły próbowano stosować przede wszystkim metody spektroskopii, m.in. spektroskopię w podczerwieni, masową i w zakresie promieni rentgenowskich. Absorpcja lub emisja promieniowania badanego tworzywa jest porównywana przez komputer z wzorcami. Po identyfikacji tworzywa, komputer przekazuje odpowiedni sygnał do urządzenia oddzielającego. Szybkość i jakość rozdzielania zależą od szybkości identyfikacji tworzywa (szybkości komputera) oraz od wydajności urządzeń oddzielających rozpoznane tworzywa. Najbardziej zaawansowaną metodą tego typu w praktyce technologicznej jest rozdzielanie wyrobów z tworzyw za pomocą spektrometru w bliskiej podczerwieni (NIR). W metodzie tej, stosując halogenowe źródło światła, uzyskuje się widma absorpcyjne i odbiciowe tworzyw. Widma te są charakterystyczne dla poszczególnych rodzajów polimerów w zależności od obecności w nich grup -CH, -OH, -NH, -CO i innych. Widma są przekazywane światłowodem do komputera, który je identyfikuje.

Zaletą tej metody jest duża czułość i szybkość identyfikacji dzięki zastosowaniu fotodetektorów (kilka tysięcy widm/s). Istotne ograniczenia występują jednak w razie tworzyw znacznie zanieczyszczonych, powleczonych oraz napełnionych sadzą. Metodą tą można



Rys. 1. Schemat instalacji do sortowania wg właściwości optycznych

Fig. 1. An optical-method sorting plant: 1 — feedstock, 2 — sorted-plastics bins, 3 — conveyor, 4 — spectrometer, 5 — sorter control unit, 6 — pneumatic nozzles, 7 — unidentified plastics, 8 — signalling

identyfikować również dodatki, np. obecność bromopochodnych.

Od ok. 2 lat pracują już pierwsze instalacje przemysłowe, w których zostały zastosowane takie urządzenia. Schemat takiej instalacji pokazuje rys. 1. W najnowszych urządzeniach można już identyfikować liczne klasy różnych polimerów (por. zestawienie w tabeli 2). W praktyce przemysłowej z reguły dotyczy to jednak ograniczonej liczby ich typów.

T a b e l a 2. Klasy polimerów identyfikowanych obecnie metodą NIR (system firmy "Brucker")<sup>\*)</sup>

T a b l e 2. Polymer classes identified by the NIR method (Brucker company system)

|          |     |          |          |
|----------|-----|----------|----------|
| ABS      | SB  | ASA      | PA       |
| PBT      | PC  | PC + ABS | PE       |
| PMMA     | POM | PP       | PPE + PA |
| PPE + SB | PS  | PVC      | RIM      |
| SAN      | SMA | SMC      | TPU      |

<sup>\*)</sup> Obecnie ujętych jest w bazie danych 30 klas materiałów stosowanych w budowie pojazdów, łącznie z mieszankami polimerów i piankami.

### Sortowanie według właściwości temperaturowych

Poprzez schłodzenie tworzyw w ciekłym azocie można uzyskiwać z nich łatwe do rozdrabniania kruche materiały, lub też, wykorzystując różną kurczliwość, można oddzielać tworzywa od metalu (np. aluminiowe kapsle do butelek od wkładu z PVC).

Innym sposobem jest oddzielanie wykonywanych z PS kubków do jogurtów od kubków z innych tworzyw, np. z PP. Kubki, przesuwając się na taśmie, przechodzą przez piec tunelowy. Kubki z PS ulegają odkształceniu pod wpływem własnego ciężaru w niższej temperaturze (przybierając postać płaskiego placka),

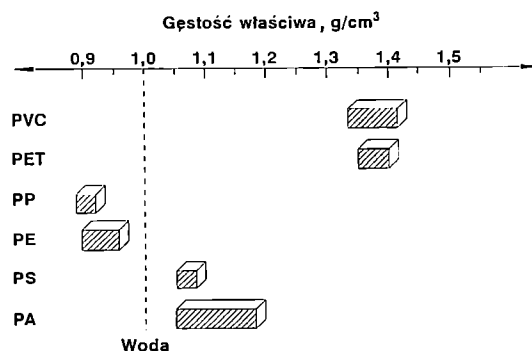
dzięki czemu łatwo oddzielić je mechanicznie od innych tworzyw, np. poprzez ustawienie poprzeczki na odpowiedniej wysokości.

### SORTOWANIE ROZDROBNIONYCH MIESZANIN TWORZYW SZTUCZNYCH

#### Sortowanie według gęstości

Najczęściej dotychczas stosowanym sposobem rozdzielania mieszanin tworzyw sztucznych jest rozdzielanie według gęstości. Na skalę techniczną sortuje się obecnie tworzywa wg gęstości trzema sposobami: "pływakopada", w hydrocyklonach oraz w wirówkach.

Metody te stosuje się najczęściej do oddzielania poliolefin od innych polimerów o większej gęstości, gdyż rozdział taki można przeprowadzić w wodzie (rys. 2). Oddzielanie PS od PVC jest możliwe, ale muszą być wówczas stosowane media o gęstości większej niż wo-



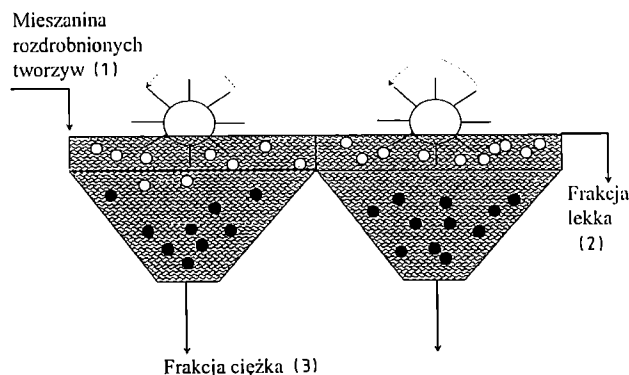
Rys. 2. Zakresy gęstości podstawowych termoplastów  
Fig. 2. Densities of common thermoplastics

da, np. zawiesiny minerałów w wodzie albo roztwory soli.

#### Sortowanie metodą "pływa-opada"

Rozdzielanie metodą "pływa-opada" następuje w wyniku działania siły wyporu cieczy o wybranej gęstości. Tworzywa o gęstości większej niż gęstość takiej cieczy opadają na dno, natomiast tworzywa o mniejszej gęstości pływają na powierzchni. Przez zmianę gęstości cieczy można wpływać na to, które tworzywa opadają na dno zbiornika.

Mieszanina typowych termoplastów stosowanych na opakowania zostaje rozdzielona na pływającą frakcję poliolefin oraz na opadającą na dno PVC, PS i PET. Uzyskiwana czystość tak rozdzielanych poliolefin wynosi ok. 98% mas. Wadą tej metody jest stosunkowo mała przepustowość instalacji (powolne opadanie cząstek) oraz duże zużycie wody. Spowodowało to, że po pierwszych próbach przemysłowych zrezygnowano ze stosowania tego wariantu rozdzielania.



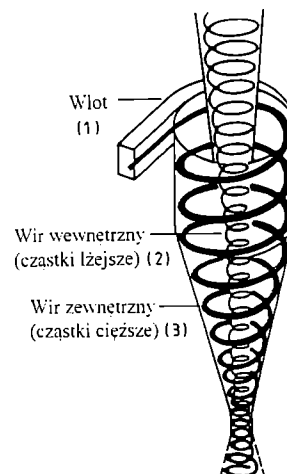
Rys. 3. Zasada działania urządzenia do rozdzielania metodą "pływa-opada"

Fig. 3. The „swim-drown” method: 1 — comminuted plastics, 2 — light fraction, 3 — heavy fraction

Schemat urządzenia do rozdzielania metodą "pływa-opada" przedstawia rys. 3. W urządzeniu tym rozdrobnione odpady podaje się do zbiornika z cieczą o znanej gęstości. Tworzywa pozostające na powierzchni kieruje się za pomocą układu osadzonych na walcach wioseł na walec odprowadzający, natomiast opadająca frakcja ciężka musi zostać rozdzielona w dalszej części instalacji.

#### Rozdzielanie tworzyw w hydrocyklonach

W hydrocyklonach rozdzielanie tworzyw zachodzi poprzez działanie siły odśrodkowej. W metodzie tej zmieszana z rozdrobnionymi odpadami ciecz o określonej gęstości wprowadza się pod ciśnieniem stycznie do ściany bocznej hydrocyklonu. Kształt hydrocyklonu (rys. 4) powoduje wprowadzenie zawiesiny w ruch wirowy wywołujący przyspieszenie odśrodkowe ok. 250 razy większe od przyspieszenia ziemskiego. Działające przy tym siły wypychają cięższe cząstki na zewnątrz, a



Rys. 4. Zasada działania hydrocyklonu

Fig. 4. The hydrocyclone method: 1 — inlet, 2 — internal vortex (light particles), 3 — external vortex (heavy particles)

cząstki lżejsze (o mniejszej gęstości) zostają skierowane do powstałego wewnętrznego wiru cieczy. Wprowadzona od góry w środek wiru rura odsysa lekką frakcję.

Gdy stosuje się hydrocyklony, ważne jest, aby cząstki rozdzielanych tworzyw miały możliwie zbliżone wymiary (również grubość). Korzystne jest łączenie hydrocyklonów w szeregi, co poprawia jakość rozdzielania. Metodą tą można uzyskać PVC o czystości 98—99% mas., a poliolefiny — 99% mas.

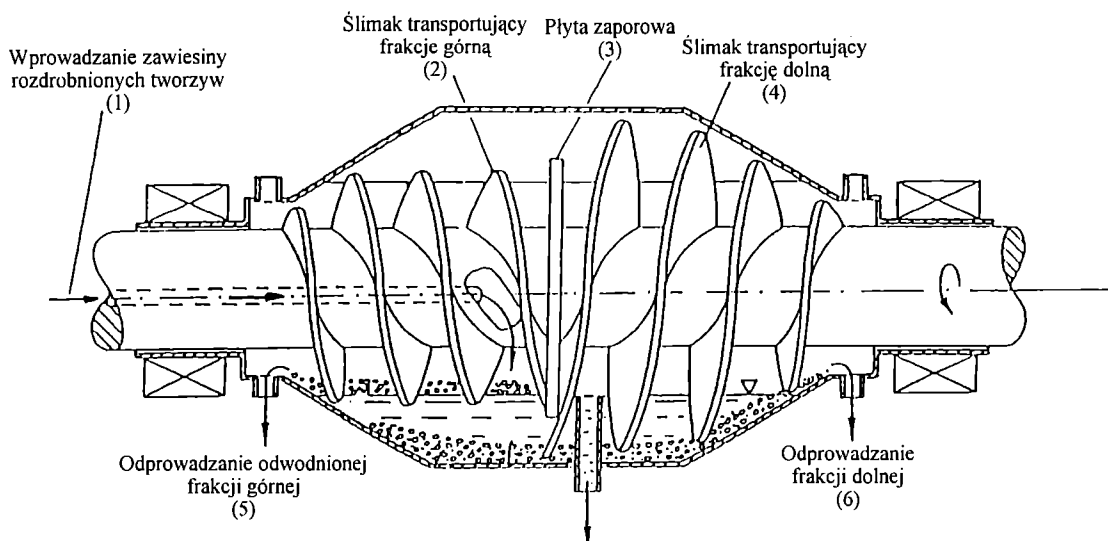
Hydrocyklony są znacznie wydajniejsze niż metoda "pływa-opada" i zajmują niewiele miejsca, dlatego też zostały zastosowane w wielu instalacjach technicznych. Liczne firmy oferują instalacje do sortowania tworzyw sztucznych tą metodą.

#### Wirówka sortująca

Podobnie jak w hydrocyklonie, wykorzystuje się w tej metodzie działanie siły odśrodkowej. Poziomo zainstalowana wirówka (rys. 5) jest częściowo wypełniona cieczą. Wskutek szybkich obrotów bębna wirówki tworzy się szybko rotujący pierścień cieczy przylegający do ścian bębna. Zawieszona rozdrobnionej mieszaniny tworzyw w cieczy, doprowadzona osiowo do wirówki, trafia na powierzchnię cieczy i pod wpływem siły odśrodkowej jest rozdzielana na frakcję lekką (pływającą) i frakcję ciężką. Frakcje te są odprowadzane z wnętrza wirówki przez dwa ślimaki o różnych średnicach z lewym i prawym skretem, rozdzielone tarczą uniemożliwiającą mieszanie się frakcji.

Zalety wirówki to duża efektywność rozdzielania tworzyw, małe zapotrzebowanie na wodę, zajmowanie małej powierzchni, łatwa obsługa, małe zużycie energii; wymiary i kształt cząstek tworzyw nie mają tu dużego znaczenia. Czystość oddzielanej frakcji poliolefin przekracza nawet 99,5% mas.

W latach 1995—1996 nastąpiło wyraźne ożywienie w budowie tego typu instalacji. W październiku 1996 r. pracowało lub było w trakcie montażu w RFN, Belgii i



Rys. 5. Schemat budowy i działania wirówki sortującej

Fig. 5. The centrifuge sorting: 1 — comminuted plastics, 2 — upper fraction conveying screw, 3 — baffle, 4 — lower fraction conveying screw, 5 — outlet of dewatered upper fraction, 6 — outlet of dewatered lower fraction

T a b e l a 3. Porównanie różnych metod rozdzielania według gęstości rozdrobnionych mieszanin tworzyw sztucznych  
Ta b l e 3. Comparison of various plastics waste separation methods based on density differences

|                                              | Wirówka |      |       | Hydrocyklon |      |      | Metoda "pływa-opada" |    |     |
|----------------------------------------------|---------|------|-------|-------------|------|------|----------------------|----|-----|
| Czas przebywania, s                          | 25      |      |       | 1           |      |      | 400                  |    |     |
| Wymiar cząstek <sup>*)</sup> , mm            | 0,5     | 2    | 10    | 0,5         | 2    | 10   | 0,5                  | 2  | 10  |
| Średnia prędkość opadania, mm/s              | 860     | 1550 | 4000  | 140         | 500  | 1200 | 6                    | 30 | 120 |
| Czas opadania, s                             | 0,11    | 0,06 | 0,025 | 0,6         | 0,18 | 0,07 | 300                  | 67 | 15  |
| Stosunek czasu przebywania do czasu opadania | 227     | 416  | 1000  | 1,7         | 5,6  | 14   | 1,3                  | 6  | 27  |

\*) W postaci kulistej; w przypadku folii prędkość opadania jest znacznie mniejsza.

Japonii 9 wirówek sortujących o wydajności do 2 t/h, umiejscowionych w siedmiu różnych instalacjach. Jedy-nym producentem omówionych wirówek sortujących w RFN jest firma KHD w Kolonii.

Tabela 3 podaje dane charakteryzujące wydajności przedstawionych powyżej trzech metod rozdzielania według gęstości rozdrobnionych mieszanin tworzyw. Wyraźnie najszybsze jest sortowanie w wirówce. Róż-nica w czasie i prędkości opadania między wirówką a metodą "pływa-opada" wynosi kilka rzędów.

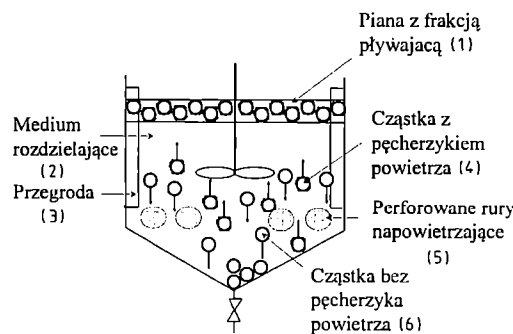
### Rozdzielanie wg różnic zwilżalności

Ogólnie biorąc tworzywa są hydrofobowe, tzn. źle zwilżalne przez wodę. Do cząstek tworzyw zanurzo-

nych w wodzie łatwo przylegają pęcherzyki powietrza, powodując pływanie cząstek na powierzchni. Poprzez dodatek odpowiednich substancji powierzchniowo czynnych można przeprowadzić tworzywa w hydrofi-lowie, tzn. całkowicie zwilżalne przez wodę. Substancje te nazywane są we flotacji depresorami. Istnieją również substancje uniemożliwiające zwilżanie, zwane zbiera-czami.

Rozdzielanie wg różnic zwilżalności polega na celo-wym dobraniu środowiska rozdzielającego tak, aby wy-korzystane zostało zjawisko selektywnej hydrofobizacji cząstek tworzywa.

Schemat działania komory flotacyjnej przeznaczonej do tworzyw pokazuje rys. 6. Komora jest wypełniona ciekłym środowiskiem rozdzielającym z dodatkiem de-



Rys. 6. Schemat działania komory flotacyjnej

Fig. 6. The flotation tank method: 1 — floatate-carrying froth, 2 — separating medium, 3 — baffle, 4 — air bubble-borne particle, 5 — perforated aerating tubes, 6 — particle without an air bubble

presora i substancji pianotwórczej. Piana uniemożliwia tonięcie cząstek, które wypłynęły na powierzchnię. Mieszanie zapewnia efektywne zwilżanie, wypływanie i tonięcie cząstek. Przegrody zakłócające przepływ uniemożliwiają ruch wirowy strumienia cieczy rozdzielającej z cząstkami tworzywa i jednocześnie zapewniają tworzenie się spokojnej strefy rozdzielania w przypadku kompleksów cząstka tworzywa-pęcherzyki powietrza.

Cykl pracy komory flotacyjnej jest następujący:

- załadunek mieszaniny rozdrobnionych tworzyw,
- mieszanie i nadmuchiwanie powietrza (kondycjonowanie — ok. 2 min),
- rozdzielanie bez napowietrzania i mieszania (cząstki mogą opadać i wypływać),
- zdejmowanie piany i cząstek z dna komory.

W procesie flotacji materiał wypływający na powierzchnię może mieć gęstość większą niż środowisko rozdzielające. Wymiary cząstek tworzywa powinny być mniejsze niż 6 mm. Rozdzielanie według różnic zwilżalności PE, PS i PVC daje stopień czystości od 92 do 99%. Dotychczas nie istnieją jeszcze instalacje wykorzystujące ten sposób rozdzielania na skalę techniczną.

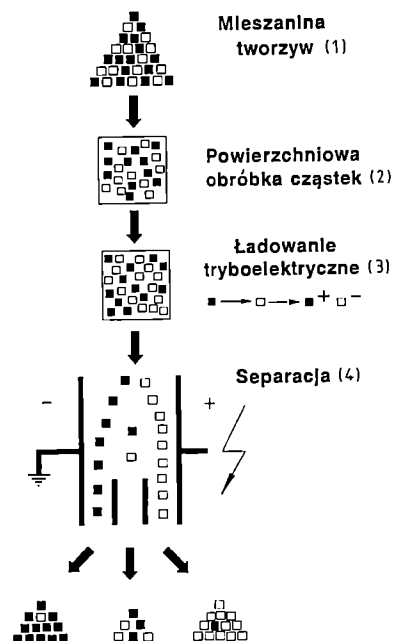
### Rozdzielanie elektrostatyczne

Metoda elektrostatycznego rozdzielu tworzyw, oznaczona przez twórców skrótem ESTA, opiera się na różnicy ładunku tryboelektrycznego polimerów. Rozdrobnione tworzywa powleka się wstępnie odpowiednio dobranymi związkami powierzchniowo czynnymi (zawartość rzędu ppm) i poddaje intensywnemu tarcu, które powoduje gromadzenie na ich powierzchni ładunku elektrostatycznego. W rezultacie następuje dodatnie lub ujemne naładowanie cząstek poszczególnych rodzajów tworzyw. Ładunki te są tak duże, że w chwili grawitacyjnego opadania rozdrobnionego tworzywa między elektrodami wysokiego napięcia cząstki tworzyw poruszają się w kierunku odpowiednich elektrod, co prowadzi do rozdzielu mieszaniny. Zasada metody jest schematycznie zilustrowana na rys. 7, a uszeregowanie tworzyw pod względem naładowania tryboelektrycznego przedstawia rys. 8.

Ładunek, jaki przybierają tworzywa w wyniku kontaktu tryboelektrycznego zależy jednak od innych polimerów, które biorą udział w tym procesie. Na przykład rezultatem tryboelektrycznego zetknięcia PVC i PET jest ujemne naładowanie PVC, a dodatnie PET. Natomiast w przypadku mieszaniny PET i PS jest odwrotnie: ładunek ujemny uzyskuje PET, a PS zostaje naładowany dodatnio.

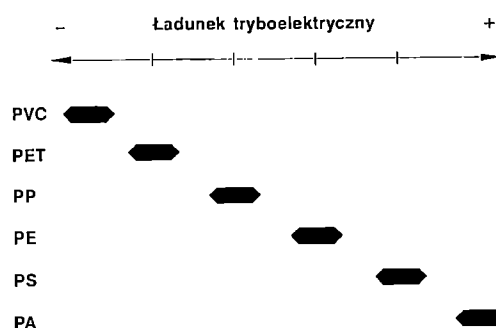
W warunkach większej liczby składników występują poważne problemy z zachowaniem się ładunków, albo — tryboelektryczne naładowanie tworzyw może być wtedy mniej selektywne. Jedyny wyjątek stanowi PVC, który zawsze przybiera ładunek ujemny i może być wyodrębniony z każdej mieszaniny tworzyw.

Poważną wadą metody rozdzielania elektrostatycznego jest zbyt duża wrażliwość na składniki dodatkowe



Rys. 7. Zasada rozdzielu tworzyw sztucznych metodą elektrostatyczną

Fig. 7. The electrostatic method: 1 — mixed plastics, 2 — surface treatment of particles, 3 — electric charging, 4 — separation



Rys. 8. Tryboelektryczny szereg polimerów

Fig. 8. The triboelectric series of polymers

obecne w tworzywach, takie jak plastyfikatory, pigmenty oraz zanieczyszczenia zewnętrzne; komplikują one zwłaszcza rozdział PE od PP. Ponieważ te dwa polimery bezpośrednio sąsiadują ze sobą w szeregu tryboelektrycznym (rys. 8), nie ładują się selektywnie jeśli ich powierzchnia jest zabrudzona.

Rozdział ciężkich frakcji mieszaniny tworzyw, takich jak PVC lub PS, nie stwarza problemów, bowiem ich położenie w szeregu tryboelektrycznym jest stosunkowo odległe. Zanieczyszczenia lub dodatki mogą spowodować pewne przesunięcia w tym szeregu, ale nie zmieniają ładunku tworzyw. Należy także pamiętać, że przewodność powierzchniowa zależy w dużym stopniu od wilgotności powierzchni oraz wilgotności powietrza.

Zwłaszcza interesująca jest możliwość rozdzielania tą metodą poliolefin, których gęstości są zbliżone, co wyklucza rozdzielanie według gęstości. W wyniku prób

rozdzielania mieszanin PP : PE = 1 : 1 uzyskano następujące stopnie czystości: PP — 98,4%, PE — 97,1 %. Ponadto zalety metody rozdzielania elektrostatycznego to brak konieczności używania cieczy (metoda sucha), niewielkie zużycie energii oraz duża wydajność.

W przypadku mieszanin wieloskładnikowych konieczne jest połączenie tej metody z rozdzielaniem wg gęstości, myciem i innymi metodami rozdzielania.

Od wiosny 1995 r. pracuje w Niemczech pierwsza i dotychczas jedyna instalacja techniczna o wydajności ok. 200 kg/h zbudowana przez firmę "Kali und Salz" z Kassel. Ze względu na wymienione trudności, zainteresowanie tą metodą wyraźnie zmalało i nie podjęto planowanej budowy instalacji przemysłowej.

### Sortowanie według właściwości chemicznych

Rozdzielanie odpadów termoplastycznych jest również możliwe za pomocą odpowiednich rozpuszczalników. Stosuje się rozpuszczalniki, które rozpuszczają określony polimer oddzielając go tym samym od innych materiałów, bądź też stosuje się środki strącające, które wytrącają polimer z roztworu.

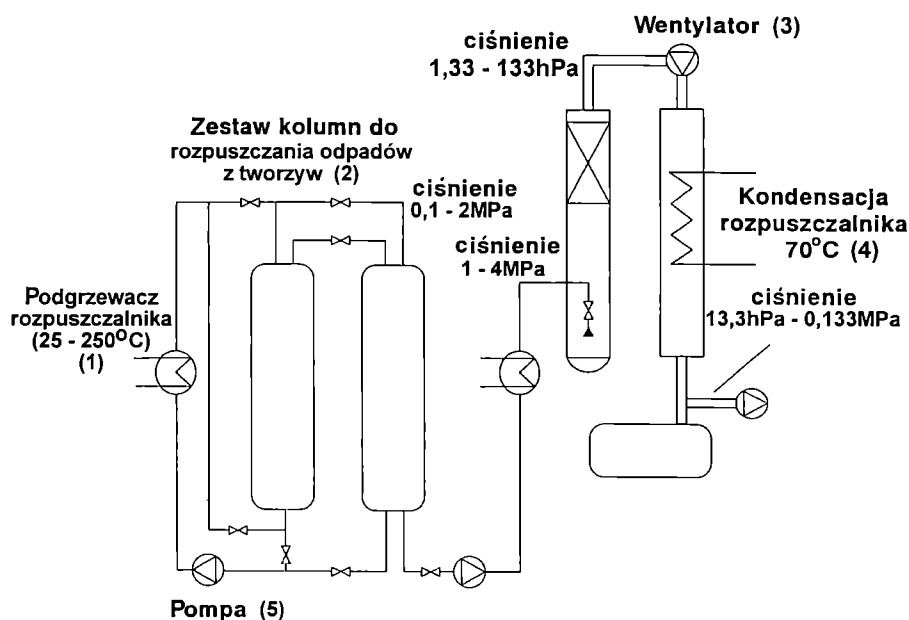
Zalety tej metody polegają na możliwości rozdzielania tworzyw o zbliżonej gęstości, możliwości szerokiego zastosowania (dzięki użyciu różnych rozpuszczalników), bardzo dobrej jakości recyklatu i równoczesnego oddzielania zanieczyszczeń. Niestety, toksyczność rozpuszczalników organicznych wymaga z reguły znacznych nakładów finansowych, po to aby zachować odpowiednie warunki BHP; poza tym trzeba na ogół dostarczyć dużej ilości energii w celu odparowania rozpuszczalnika.

Odpady opakowaniowe (mieszanina PE, PP, PS i

PVC) można rozdzielić na poszczególne typy przy użyciu jednego rozpuszczalnika dzięki zastosowaniu różnej temperatury i rozmaitego ciśnienia. Istota metody, opracowanej na jednym z uniwersytetów w USA, polega na sukcesywnym rozpuszczaniu przez rozpuszczalnik (ksylen) kolejnych składników mieszaniny tworzyw, poczynając od temperatury pokojowej i ciśnienia atmosferycznego, kiedy to rozpuszczeniu ulega PS, aż do temp. 138°C, gdy rozpuszcza się PVC (PET pozostaje nierozpuszczony). Ksylenowy roztwór PS kieruje się do kolumny, w której pod ciśnieniem 1—4 MPa (10—40 atm) jest ogrzewany do temp. ok. 250°C, aby go utrzymać w stanie ciekłym. Następnie roztwór wprowadza się do kolumny próżniowej, gdzie następuje odparowanie rozpuszczalnika. Ta nagła zmiana ciśnienia powoduje, że ksylen bardzo szybko odparowuje, pozostawiając czysty polimer. Natomiast ksylen, ponownie sprężony i ochłodzony, jest zawracany i po kolejnym ogrzaniu, już do wyższej temperatury, rozpuszcza następny polimer. Cykl taki powtarza się kilkakrotnie i, po rozpuszczeniu ostatniego składnika mieszaniny tworzyw, ksylen od-

T a b e l a 4. Polimery odzyskiwane przez rozpuszczanie w ksylenie  
T a b l e 4. Polymers reclaimed by dissolution in xylene

| Temperatura rozpuszczania, °C | Wyodrębniony polimer | Czystość frakcji, % |
|-------------------------------|----------------------|---------------------|
| 25                            | PS                   | 99,6                |
| 75                            | PE-LD                | 98,3                |
| 105                           | PE-HD                | 99,3                |
| 120                           | PP                   | 99,6                |
| 138                           | PVC                  | 99,4                |
| —                             | PET                  | 100                 |



Rys. 9. Schemat instalacji do rozdziału odpadów tworzyw sztucznych metodą selektywnego rozpuszczania w ksylenie

Fig. 9. A solubility-method sorting plant: 1 — heater, 2 — columns for dissolving plastics waste, 3 — fan, 4 — condensation of solvent, 5 — pump

dziela się i odzyskuje. Schemat takiej instalacji ilustruje rys. 9, natomiast tabela 4 przedstawia polimery odzyskiwane w wyniku selektywnego rozpuszczania w ksylenie.

Dotychczas jednak metoda ta mimo swoich zalet nie znalazła szerokiego praktycznego zastosowania. Natomiast spotyka się ona z zarzutem dotyczącym zarówno stosowania niebezpiecznego rozpuszczalnika, jak i wysokiego kosztu instalacji technicznej. Autorzy metody obliczyli bowiem, że budowa instalacji pilotowej o zdolności ok. 200 kg/h kosztowałaby więcej niż 16 milionów dolarów.

#### PRZYKŁADY INSTALACJI DO ROZDZIAŁU ODPADOWYCH TWORZYW SZTUCZNYCH Z OPAKOWAŃ

##### Instalacja do sortowania zawartości tzw. żółtego worka (*Duales System Deutschland*)

Do tzw. żółtego worka zbierane są w Niemczech wszelkiego typu opakowania używane w gospodarstwie domowym, łącznie z puszkami metalowymi i kartonami po napojach (bez opakowań szklanych). Przed odzyskaniem tworzyw sztucznych trzeba więc rozdzielić zebrane opakowania na poszczególne frakcje. Instalacja zbudowana przez firmę "Thyssen-Henschel" we współpracy z Institut fuer Werkstofftechnik Uniwersytetu w Kassel i uruchomiona w styczniu 1995 r. służy do w pełni zautomatyzowanego sortowania zawartości "żółtego worka".

Instalacja ma wydajność 1 t/h i zajmuje ok. 400 m<sup>2</sup> powierzchni (bez magazynu), a obsługuje ją 6 osób (1 zmiana).

Instalacja składa się z następujących elementów (rys. 10):

- Urządzenie rozrywające worki (a).
- Oddzielanie pneumatyczne folii (i wyrobów o dużej objętości) oraz zanieczyszczeń (np. kartony, wiadra, gazety, książki itp.) (b). Folie o powierzchni większej niż A4 są odzyskiwane jako frakcja 1.
- Odzyskiwanie żelaza przez zastosowanie elektromagnesów (frakcja 2) (c).

— Odzyskiwanie butelek i kubków z tworzyw sztucznych (pneumatycznie na taśmie wznoszącej się) (d) (frakcja 3).

— Oddzielanie aluminium (puszki po napojach, folie aluminiowe) (frakcja 4) i kartonów po napojach (frakcja 5) w bębnie z siatki (e).

— Zbieranie pozostałej mieszaniny odpadów. Są to na ogół małe wyroby, np. tuby, małe kawałki folii, metale nieżelazne (miedź), zanieczyszczenia (szkło, papier, drewno) (f).

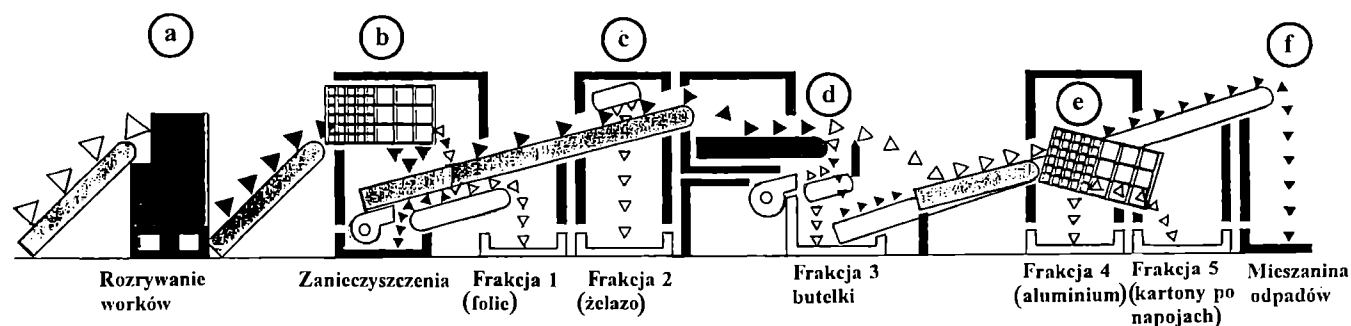
W pracujących obecnie sortowniach automatycznych konieczne jest dodatkowe ręczne sortowanie frakcji aluminium. Wykonuje się to w specjalnej kabinie, do której dostarczane jest świeże powietrze, aby poprawić warunki pracy załogi.

##### Instalacja do sortowania tworzyw sztucznych z zastosowaniem hydrocyklonów

Materiałem wsadowym może być mieszanina folii i butelek z tworzyw sztucznych; nie jest przy tym konieczne wstępne sortowanie. Krytyczne zanieczyszczenia to drewno, tkaniny, słoma i materiały lekkie, które zanieczyszczają otrzymywaną frakcję lekką. Schemat instalacji przedstawia rys. 11 (por. też rys. 4).

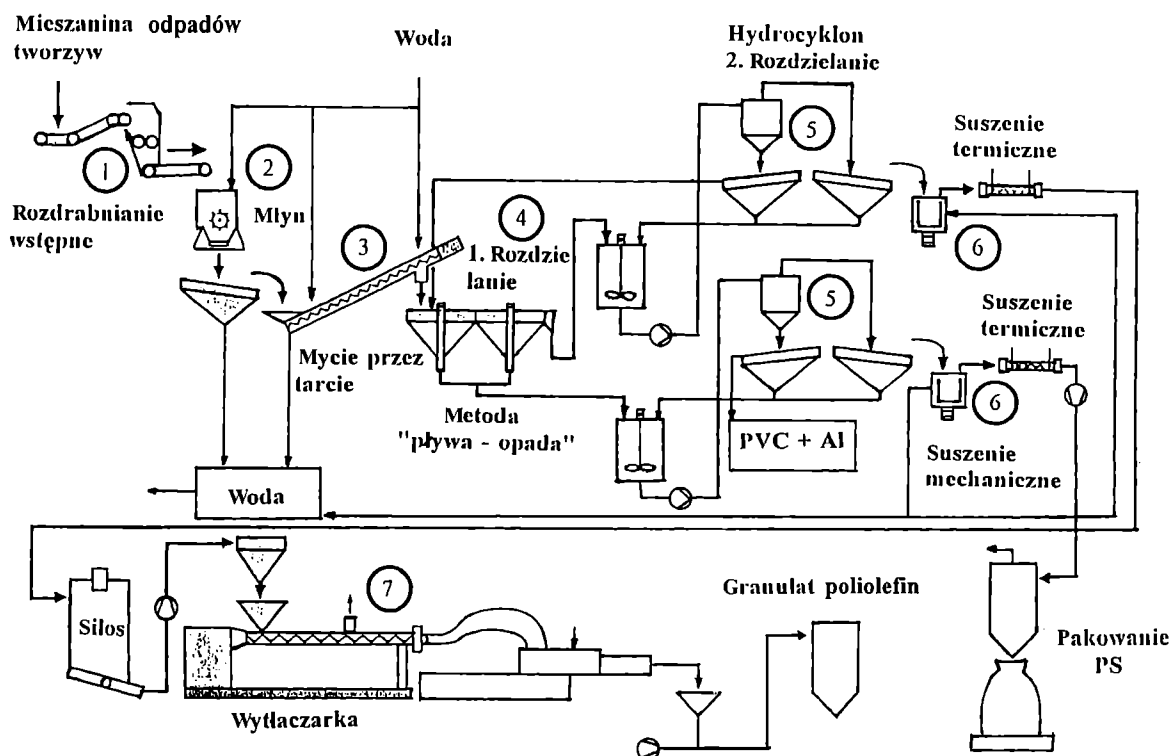
Proces rozdzielania przebiega w następujących etapach:

- Rozdrabnianie wstępne odpadów tworzyw i transportowanie taśmą (z jednoczesnym oddzielaniem metali przez elektromagnesy) do młyna (1).
- Mielenie na mokro w młynie (2) (co daje jednocześnie efekt mycia) na cząstki o wymiarach 10x10 mm.
- Oczyszczanie miazgi w wyniku tarcia na mokro w myjni (3).
- Rozdzielanie wstępne metodą "pływa-opada". Frakcja lekka zawiera po tym etapie ok. 95% mas poliolefin (4).
- Frakcję lekką i ciężką podaje się poprzez osobne zbiorniki z mieszałkami do dwóch hydrocyklonów (5). Frakcja lekka po przejściu przez hydrocyklon zawiera ok. 99% mas. poliolefin. Frakcja ciężka jest rozdzielana na PS i PVC z resztkami aluminium.
- Mechaniczne i termiczne suszenie rozdzielonej fra-



Rys. 10. Schemat instalacji do automatycznego sortowania zawartości "żółtego worka" (dodatkowe objaśnienia w tekście)  
Fig. 10. A "yellow bag" automatic sorting plant: a — tearing of bags, b — separation of large films and impurities, c — fraction 2 (iron), d — fraction 3 (bottles, cups), e — fraction 4 (aluminium) and fraction 5 (beverage packings), f — mixed wastes





Rys. 11. Schemat instalacji do sortowania tworzyw sztucznych z zastosowaniem hydrocyklonów (dodatkowe objaśnienia w tekście)

Fig. 11. A hydrocyclone sorting plant: 1 — precomminution of mixed plastics, 2 — wet milling, 3 — friction washing, 4 — preliminary „swim-drown” separation, 5 — individual separation of light fraction (polyolefins) and heavy fraction (PS + PVC) in two hydrocyclones, 6 — mechanical and thermal drying of isolated light and heavy fractions 7 — granulation of polyolefin fraction

kcji lekkiej i ciężkiej (6). Zawartość wilgoci po suszeniu nie przekracza 1% mas.

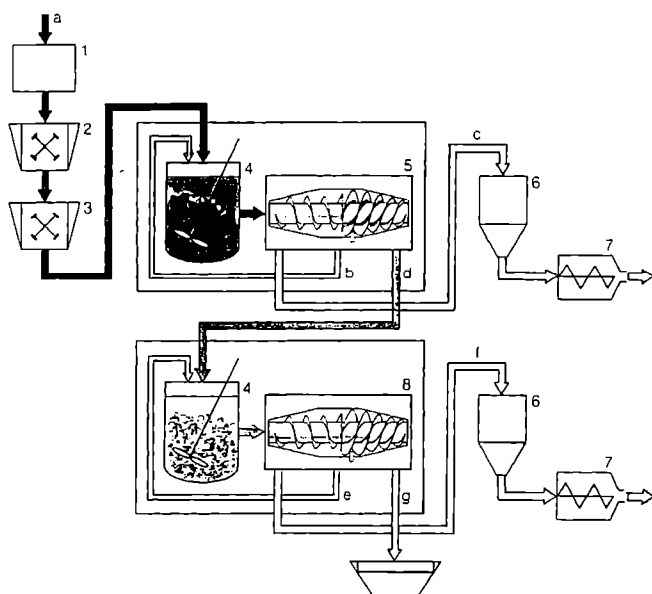
— Frakcję poliolefin granuluje się w wytłaczarce (7).

Instalacja o wydajności 1000 kg odpadów/h (6000 t rocznie) kosztuje ok. 4,5 mln DM, a koszt jej rocznej eksploatacji wynosi ok. 4 mln DM. Szereg firm oferuje różne warianty rozwiązań tego typu instalacji.

#### Instalacja do sortowania tworzyw sztucznych z zastosowaniem wirówek

Instalacja proponowana przez producenta wirówek służąca do sortowania mieszaniny odpadów z tworzyw sztucznych odzyskiwanych z tzw. żółtego worka rozdziela tworzywa na następujących etapach (rys. 12, por. też rys. 5):

- Rozdrabnianie odpadów tworzyw sprasowanych w bele (1).
- Rozdrabnianie wstępne (2).
- Rozdrabnianie końcowe (3).



Rys. 12. Schemat instalacji do sortowania tworzyw sztucznych z zastosowaniem wirówek: a) — mieszanina tworzyw, b) — obieg wody, c) — obieg drugiej cieczy rozdzielającej; pozostałe objaśnienia w tekście

Fig. 12. A centrifuge-technique sorting plant: 1, 2, 3 — preliminary and final comminution of (a) baled plastics, 4 — comminuted plastics—water mixture (b — water circulation), 5 — separation in first centrifuge, c — reclaimed polyolefins, 6, 7 — reclaimed plastics passed through an intermediate tank (6) to extruder or agglomerator (7), 8 — separation of heavy fraction (d) in second centrifuge, e — circulation of another separating liquid, f — reclaimed PS, g — heavy fraction from second centrifuge (mixture of plastics, paper, and impurities) (for other explanations see main text)

— Tworzenie mieszaniny rozdrobnionych tworzyw z wodą w zbiorniku z mieszadłem (4).

— Rozdzielanie tworzyw w pierwszej wirówce (5). W zależności od mieszaniny tworzyw, można uzyskać po tym etapie frakcję poliolefin o czystości 99,9% (c). Zawartość wilgoci zależy od powierzchni tworzywa i w odniesieniu do standardowych mieszanin tworzyw wynosi 2–5% mas.

— Frakcję ciężką z pierwszej wirówki (d) transportuje się do drugiej wirówki (8). Jako środowiska rozdzielającego można użyć roztworu soli o gęstości ok. 1,1 g/cm<sup>3</sup>. Pozwala to na odzyskanie polistyrenu (f). Frakcja ciężka (g) jest mieszaniną różnych tworzyw, papieru i zanieczyszczeń.

— Odzyskane tworzywa poprzez zbiornik pośredni (6) mogą być podawane do wytlaczarki lub aglomeratora (7).

Instalacja tego typu, z wirówkami o wydajności 2 t/h i o rocznym przerobie ok. 25 000 t, została uruchomiona przez firmę "Rethmann" w Lünen w czerwcu 1996 r. Optymalizacja jej działania odbyła się we współpracy z Institut fuer Werkstofftechnik Universitaet Kassel.

#### PODSUMOWANIE

Warunkiem właściwego recyklingu materiałowego jest uzyskiwanie recyklatów o dobrych, powtarzalnych

i zdefiniowanych właściwościach. Aby to osiągnąć, potrzebne są szybkie, tanie i niezawodne metody rozpoznawania oraz rozdzielania tworzyw. Przedstawione tu metody i instalacje do sortowania tworzyw stanowią już istotny postęp w technologii rozdziału tworzyw sztucznych w porównaniu z początkami recyklingu, jednak ciągle jeszcze koszty odzyskiwanych tworzyw są znacznie wyższe niż ceny świeżych materiałów. Nie zawsze też zadowalająca jest efektywność rozdzielania; np. frakcja poliolefinowa może składać się z polimerów o szerokim rozkładzie ciężarów cząsteczkowych oraz o różnych wartościach temperatury mięknienia i lepkości po stopieniu. Również trudności z uzyskaniem jasnych barw odzyskanych tworzyw mogą niekorzystnie wpływać na cechy użytkowe produkowanych wyrobów. Tym nie mniej w ciągu ostatnich kilku lat uruchomiono w Niemczech szereg instalacji do sortowania tworzyw sztucznych pracujących na skalę techniczną (1–2 t/h), a wiele firm oferuje gotowe instalacje o różnym stopniu automatyzacji.

*Szczegółowe informacje o opisanych w tym artykule instalacjach oraz wykaz wykorzystanej literatury można uzyskać od prof. dr. hab. Andrzeja K. Błędzkiego: Universitaet Gh Kassel, Institut fuer Werkstofftechnik, Kunststoff — und Recyclingtechnik, Moenchebergstr. 3, D 34109 Kassel; tel. 0049 / 561 / 804 3690, fax. 0049 / 561 / 804 3692*

#### Od Redakcji

*Uprzejmie informujemy, że w roku 1998 planujemy wydanie dwóch zeszytów tematycznych:*

— *nr 7–8 będzie, już tradycyjnie, poświęcony pracom z zakresu polimerów, prezentowanym na kolejnym Zjeździe PTChem (tym razem w Gdańsku);*

— *nr 11–12 będzie poświęcony żywicom epoksydowym.*