



# Struktura procesów separacji i sposoby analizy wyników separacji

## Structure of separation processes and ways of analysis of separation results

Jan DRZYMAŁA <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Prof. dr hab. inż.; Politechnika Wroclawska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Instytut Górnictwa, Zakład Przeróbki Kopalni i Odpadów; Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław; tel.: (+ 48-71) 320-68-79, e-mail: jan.drzymala@pwr.wroc.pl

RECENZENCI: Prof. Ing. Jiří ŠKVARLA, CSc; Prof. dr hab. Tadeusz TUMIDAJSKI

### Streszczenie

W różnych dziedzinach mamy do czynienia z różnymi procesami separacji. Mogą one być proste lub skomplikowane, rzeczywiste lub wirtualne, czy też małe lub duże. Procesy separacji dostarczają dwóch lub więcej produktów i dotyczą jednego lub więcej składników. Separacja jest wynikiem działania sił porządkujących, rozpraszających oraz sił rozdzielających. Ponieważ procesy separacji powinny mieć podobną strukturę, istnieje potrzeba spójnego opisu jej organizacji oraz nomenklatury, którą można użyć do analizy, oceny i porównania procesów separacji i ich wyników. W tej pracy zaprezentowano i przedyskutowano sposoby analizy wyników separacji. Analiza została oparta na pogrupowaniu właściwości układów separacji na cztery rodziny takie jak nazwa, ilość oraz jakość składników, a także główna cecha wykorzystywana do separacji. Takie pogrupowanie i ich kombinacje dostarczają sześciu różnych dwuparametrowych sposobów analizy wyników separacji i ich form graficznych. Nazwano je jako: a) wzbogacanie (ilości względem jakości), b) klasyfikacja (jakość względem wartości cechy), c) dystrybucja (ilość względem nazwy), d) rozdział (ilość względem nazwy), e) sortowanie (jakość względem nazwy), oraz f) opis. Zaprezentowana struktura układów separacji jest prosta i pozwala na lepsze rozumienie procesu separacji i jego ocenę, jak również porównanie różnych procesów separacji.

### Summary

Various separation processes are encountered in different fields. They can be simple or complex, real or virtual, micro or macro. The separation processes involve two or more products and one or more components. The separation results from the action of ordering, disordering and splitting forces of separation systems. Since all separation processes have similar structure, there is a need for a self-consistent delineation of their organization and nomenclature that can be used for analysis, evaluation, and comparison of separation processes and their results. In the paper, structure and ways of analysis of separation results is presented and discussed. The analysis is based on grouping the properties of separation systems into four families that is name, quality, quantity of components, and the main property utilized for separation of the components. Such groupings and their combinations provide six different approaches that can be used for analysis of separation data and presenting them in a graphical form. They were termed as: a) upgrading (quality vs. quantity), b) classification (quality vs. feature value), c) distribution (quantity vs. feature value), d) splitting (quantity vs. name), e) sorting (quality vs. name), and f) description (feature value vs. name). The presented structure of separation systems is simple and provide a better understanding of separation process and their evaluation as well as comparison of different separation systems.

## 1. Wprowadzenie

Procesy separacji są wszechobecne. Zachodzą one podczas zbierania owoców, prowadzenia wojen, produkcji materiałów, realizacji reakcji chemicznych i biologicznych, a także w procesach socjologicznych (np. wybory). Są one także stosowane szeroko w mineralurgii. Separacja może być rzeczywista lub wirtualna. Obecnie stosowane są różne określenia, definicje oraz wzory dla tych samych elementów separacji realizowanych w różnych dziedzinach. Dlatego istnieje potrzeba uniwersalnego rozumienia i stworzenia nomenklatury procesów separacji. Częściowa próba wykonania tego zadania została zaprezentowana w tej pracy z położeniem akcentu na strukturę i analizę procesów separacji biorąc pod uwagę składniki procesu oraz ich właściwości.

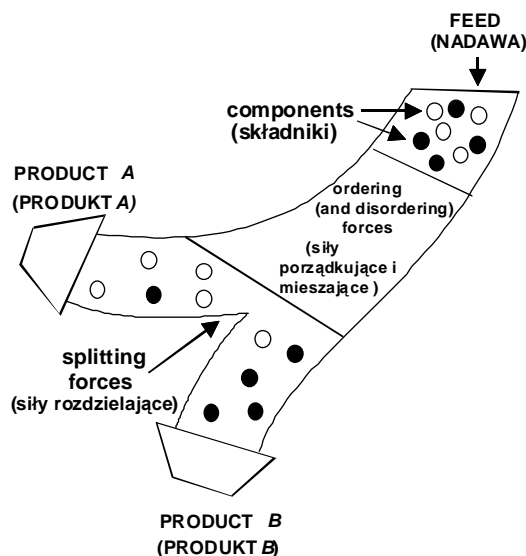
## 1. Introduction

Separation processes are very common. They take place during picking up fruits, fighting wars, manufacturing materials, performing various chemical and biological reactions, and occur in social events (e.g. elections). They are also widely applied in mineral processing. Separation processes can be real or virtual. Presently various terms, definitions, and formulas are used in different fields for the same elements of separation processes. Thus, there is a need to develop a universal understanding and nomenclature of separation processes. An effort to partially accomplish this goal is presented and discussed in this paper with emphasis on the structure and analysis of separation systems taking into account the components of separation systems and their properties.

## 2. Separacja

### 2.1. Definicja i typy separacji

Separacja jest procesem rzeczywistym lub wirtualnym, w którym zmienia się stan układu w wyniku działania sił, które można pogrupować na porządkujące, rozpraszające (Kelly and Spottiswood, 1982) i siły rozdzielające. Materiał wyjściowy (nadawa) jest dzielony fizycznie lub wirtualnie na dwa lub więcej produktów separacji (Barskij and Rubinstein, 1970). Separacja jest możliwa dzięki specyficznym właściwościom składników układu, które pod wpływem działania sił porządkujących zmieniają swoje położenie w układzie (rys.1).



Rys. 1  
Ogólny schemat procesu separacji

## 2. Separation

### 2.1. Definition and types of separations

Separation is a real or virtual process in which the state of a system changes due to the action of separation forces. The forces can be grouped into ordering, disordering (Kelly and Spottiswood, 1982) and splitting forces. The starting material (feed) is divided physically or virtually into two or more products of separation (Barskij and Rubinstein, 1970). The separation is possible due to specific properties of components of the system, which under the action of the ordering forces, change location of the components in the system (Fig.1).

Fig. 1  
A general representation of separation process

Istnieje wiele aspektów separacji. Można je pogrupować na: opis, analiza, ocena i porównanie wyników separacji (rys.2). Opisu separacji można dokonać z różnych punktów widzenia w tym mechaniki, fizyki, termodynamiki, prawdopodobieństwa, jak również ich kombinacji (rys.2). Niniejsza praca dotyczy głównie analizy wyników separacji, która może być przeprowadzona na wiele sposobów. Dobrze dokonana analiza wyników separacji może być bardzo użyteczna do dalszej ich oceny i porównania jak również wyprowadzenia empirycznych oraz teoretycznych zależności dotyczących separacji.

W zależności od rodzaju działających sił, procesy separacji można podzielić na takie jak porcjowanie, pobieranie próbek, czy też potencjalne, rzeczywiste i wirtualne (tablica 1).

W najprostszym przypadku siła rozdzielająca dzieli nadawę na dwa lub więcej produktów posiadających te same właściwości. Ma to miejsce, gdy siła porządkująca netto wynikająca z działania sił porządkujących i rozpraszających nie działa

There are many aspects of separation. They can be grouped into delineation, analysis, evaluation, and comparison of separation results (Fig.2). Delineation can be accomplished from different perspectives including mechanics, physics, thermodynamics, probability, etc., as well as their combinations (Fig.2). This work deals mainly with analysis of separation results, which can be performed in variety of ways. A well-made analysis of separation data can be very useful for their further evaluation and comparison as well as for derivation of empirical and theoretical formulas of separation.

Depending on the kind of operating forces, separation systems can be divided into types such as portioning, sampling, as well as potential, real, and virtual separations (Table 1).

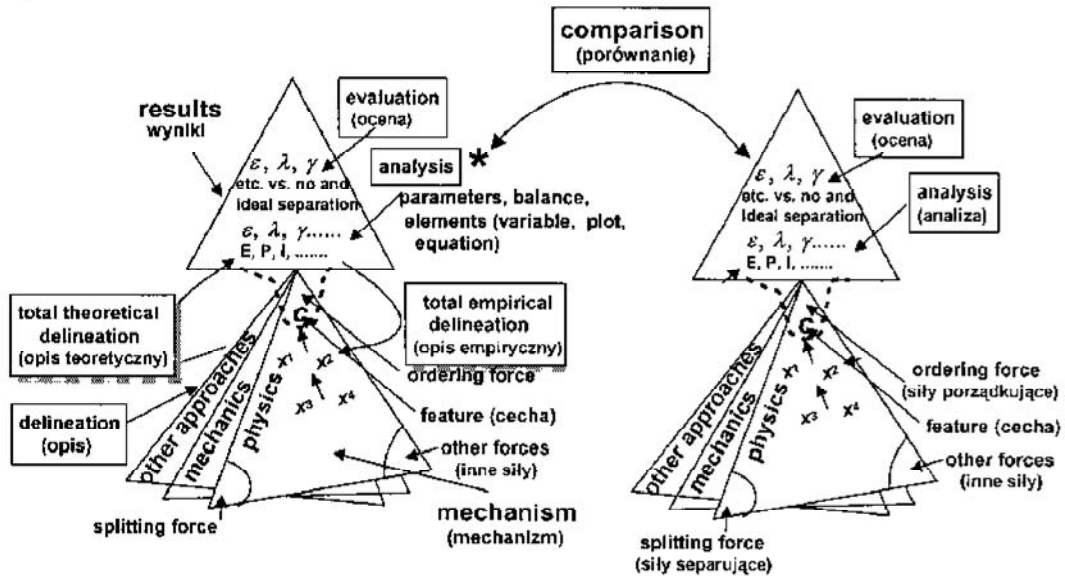
In a simplest case, a splitting force separates the feed into two, or more, products having the same properties. It happens when the net ordering force, resulting from all ordering and disordering forces, does not operate in the system. The separation of

w układzie. Separacja zbioru identycznych ziaren zboża na porcje jest dobrym przykładem porcjowania. Analiza wyników takiej separacji jest prosta ponieważ wystarczy określić ilości każdej porcji i liczbę porcji. Analizy ilościowej porcji można dokonać przez ważenie, określenie objętości, liczenie ziaren, podczas gdy jakość każdej porcji jest taka sama.

Podobne do porcjowania jest pobieranie próbek, które polega na usuwaniu małej ilości substancji z materiału wyjściowego. Ilość próbki jest dobrą miarą separacji-próbkowania.

a collection of identical grains of a cereal into portions can serve as a good example of portioning. An analysis of results of such separation is simple, because it is sufficient to determine the quantity of each portion or number of portions. The quantitative analysis can be accomplished by weighing, determining the volume, or counting the grains, while the quality of the grains is the same in all portions.

Similar to portioning is sampling which relies on removing a small amount of matter from the initial material. The quantity (amount) of the sample is a good measure of such separation.



Rys. 2. Składniki procesu separacji. Ta praca dotyczy analizy wyników separacji (co zaznaczono gwiazdką)

Fig. 2. Building blocks of separation systems. This work deals with analysis of separation results (marked with an asterisk)

Tablica 1. Możliwe typy separacji biorąc pod uwagę istnienie sił rozdzielających oraz porządkujących

Table 1. Possible types of separation taking into account the existence of splitting and ordering forces

Produkt Product		Typ separacji Separation type
Siła rozdzielająca Splitting force	Siła porządkująca netto Net ordering force	
Brak No	Brak No	brak separacji no separation
Obecna Yes	Brak No	porcjowanie, próbkowanie portioning, sampling
Brak No	Obecna Yes	potencjalna separacja potential separation
Obecna Yes	Obecna Yes	rzeczywista separacja real separation
Obecna (wirtualna) Yes (virtual)	Obecna (wirtualna) Yes (virtual)	wirtualna separacja virtual separation

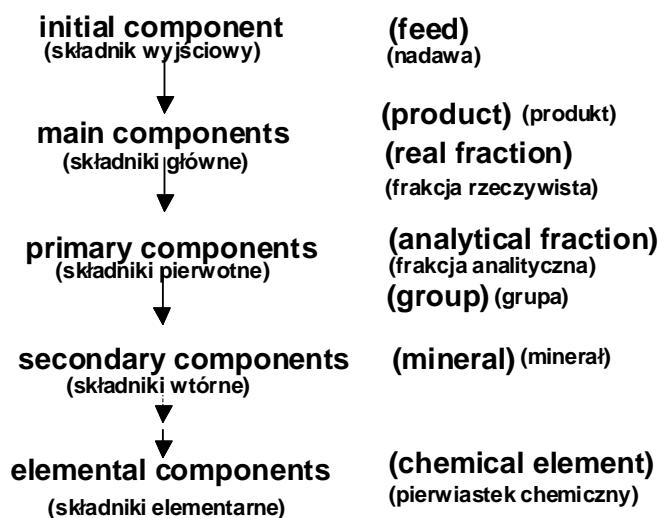
Gdy siła separująca nie jest aktywna w układzie, separacja jest tylko potencjalną, podczas gdy separacja rzeczywista ma miejsce, gdy działają zarówno siły rozdzielające jak i porządkujące. Mając rzeczywistą lub wymyśloną nadawę możliwe jest przeprowadzenie separacji wirtualnej, przyjmując odpowiednie wartości sił separacji oraz jakość i ilość produktów separacji.

Czasami zarówno siły porządkujące jak i rozdzielające są obecne w układzie, ale tylko ilość produktów separacji brana jest pod uwagę. W takim przypadku separację można traktować jako rozdział na produkty.

## 2.2. Składniki układu separacji

Ważnym etapem w analizie separacji jest zdefiniowanie jego składników. Jako składnik można wybrać pierwiastek chemiczny, minerał, związek chemiczny, frakcję rzeczywistą, frakcje analityczną, produkt, grupę ziaren, klasę, itp. Rysunek 3 pokazuje w sposób graficzny definicje możliwych składników układu separacji.

Zwykle składniki układu separacji tworzą pewną strukturę. Nadawa (składnik początkowy) jest dzielona na produkty (frakcje rzeczywiste). Produkty mogą być dalej dzielone, na przykład w laboratorium przerobczym, na frakcje analityczne. Frakcje analityczne można dalej traktować jako zbiór ziaren składający się ze składników wtórnych takich jak minerały. W minerałach można dalej wyróżnić pod-składniki, itd., aż dojdzie się do składników elementarnych, czyli pierwiastków chemicznych.



Rys. 3. Możliwe typy składników (każdy niższy w hierarchii składnik może być nazwany pod-składnikiem)

When the splitting force does not operate in the system, the separation is only potential while real separation takes place when both splitting and ordering forces are active. Having a real or imaginary feed it is possible to perform virtual separation assuming appropriate values of the separation force and/or quality as well as the quantity of the separation products.

Sometimes both ordering and splitting forces operate in the system but only the quantity of the products is considered. In such a case we can treat the separation as splitting.

## 2.2. Components of separation systems

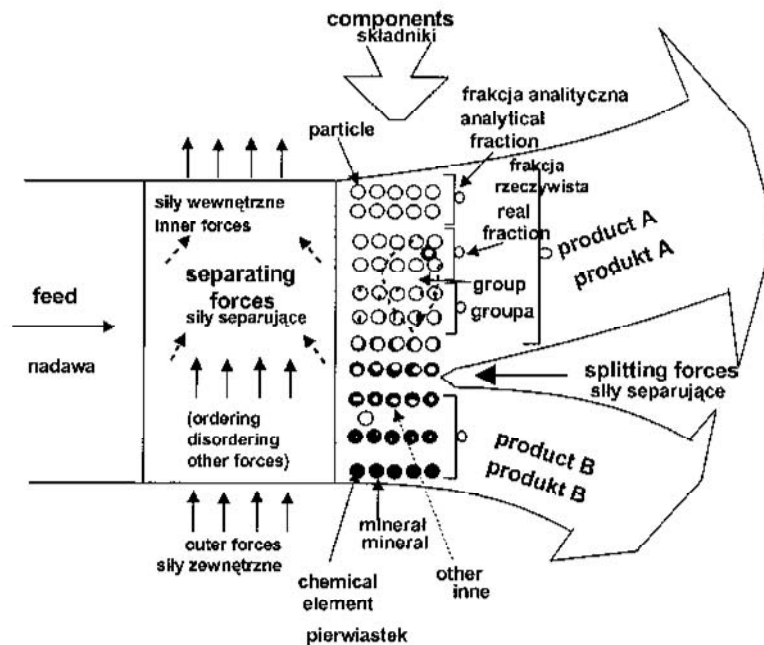
An important step in analysis of separation systems is defining components of the system. As a component one can choose chemical element, mineral, chemical compound, real fraction, analytical fraction, product, group, sort, class, etc. Figures 3 shows, in a graphical form, definitions of possible components of a separation system.

Usually, the components of the separation system form a structure. The feed (initial component) is divided into products. The products (main components) can be divided further, for instance in a research or analytical laboratory into analytical fractions. The analytical fractions (primary components such as analytical fraction, group of particles, etc.) can be further split into secondary components such as minerals. The secondary component can also be split into sub-component and so on, and finally into elemental components (chemical elements).

Fig. 3. Possible types of components (each lower-in-hierarchy component can be called sub-component)

Składniki nadawy i produktów separacji w formie graficznej są pokazane na rys. 4.

The components of the feed and products of separation are shown in a graphical form in Fig. 4.



Rys. 4.  
Możliwe składniki nadawy i produktów separacji

Fig. 4.  
Possible components of feed and products of separation

### 2.3. Cechy składników

Składniki mają różne cechy w tym masę, rozmiar, gęstość, hydrofobowość, podatność magnetyczną, nazwę, temperaturę, itp. Cechy te można pogrupować na rodziny takie jak nazwa, ilość, jakość, cecha główna (i od niej zależne cechy) oraz cechy neutralne. Jakość składnika jest determinowana ilością podskładnika w składniku (rys. 5). Z cechy składników i podskładników można utworzyć strukturę fraktalną pokazaną na rys.5.

Informacja o typie składników mówi o jego tożsamości i może to być na przykład nazwa. Ilość charakteryzuje mnogość składnika (masa, ciężar, objętość, populacja, itp.). Główny parametr separacji bezpośrednio wpływa na wyniki separacji i jest charakteryzowany za pomocą np. jego wartości. To może być gęstość dla separacji grawitacyjnej czy też hydrofobowość dla flotacji. Niektóre parametry nie wpływają na wyniki separacji i mogą być nazwane parametrami neutralnymi. Jakość składnika wyraża się za pomocą ilości podskładnika w składniku.

Z praktycznego punktu widzenia można wyróżnić cztery rodziny cech składników układu separacji. Są to typ, ilość, jakość, oraz cecha główna (rys. 6).

Należy zauważyć, że główna cecha jest zwykle pochodną wielu innych cech (rys.1). Cechy składnika systemu separacji można ułożyć w strukturę hierarchiczną z cechą główną, która jest odpowiedzialna za separację, położoną na szczycie trójkąta (rys.7).

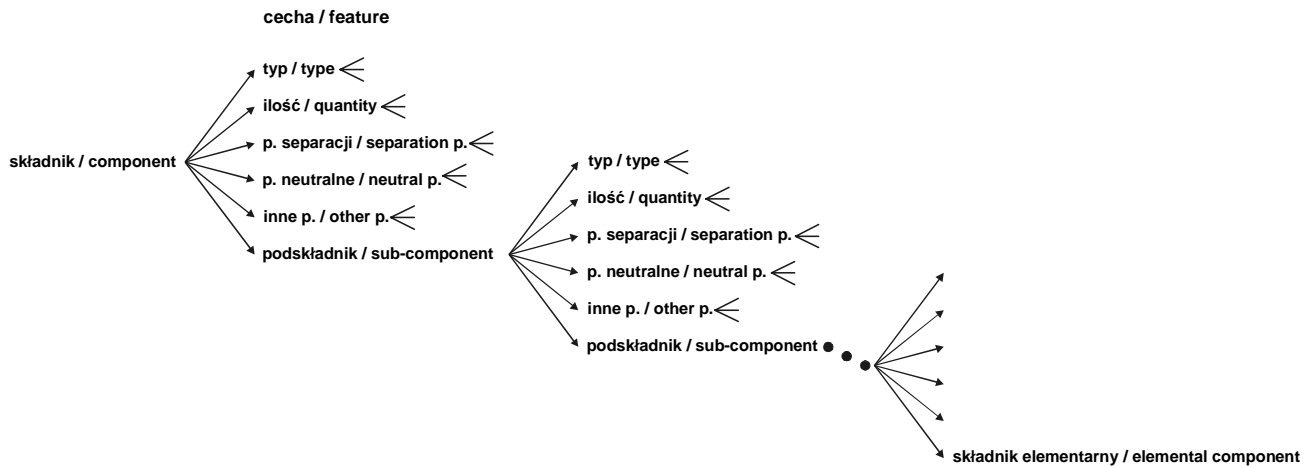
### 2.3. Features of components

Components have various features including mass, size, density, hydrophobicity, magnetic susceptibility, identity, temperature, etc. The features can be grouped into such families as type (name), quantity, quality, main (and dependent), neutral, and other parameters. The quality of a component is determined as the amount of a subcomponent in the component (Fig. 5). The features of components and sub-components of a separation system can be arranged into a fractal-like structure as shown in Fig. 5.

The information on the type of component provides identity, for instance name or symbol, of the component. The quantity is characterized by the amount of component (mass, weight, volume, population, etc.). The separation main parameter directly influences the results of separation and is characterized by its value. It can be, for instance, density for gravity separation and hydrophobicity for flotation. Some parameters do not influence the results of separation and they can be referred to as the neutral parameters. The quality of a component is expressed by the amount of a sub-component in the component.

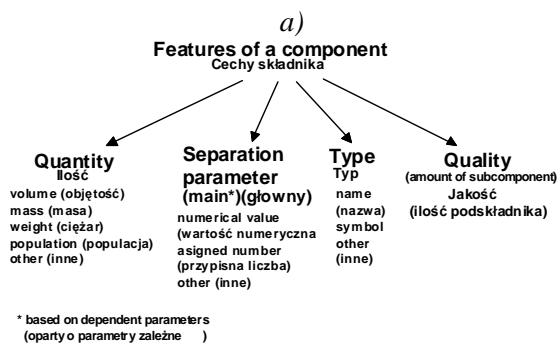
From a practical point of view there are four essential families of features of components of separation system. They are: type, quality, quantity, and the main feature (Fig. 6).

It should be noticed that the main feature is usually based on many other features (Fig.1). The features of a component of a separation system can usually be arranged into a hierarchical structure with the main feature, which is responsible for separation, in the top of the triangle (Fig. 7).



Rys. 5. Struktura fraktalna cech składników układu separacji (p – oznacza parametry)

Fig. 5. Fractal-like structure of features of a components of a separation system (p – stands for parameters).



Rys. 6. Cztery podstawowe rodziny cech składnika systemu separacji pokazane w formie opisowej (a) oraz graficznej (b)

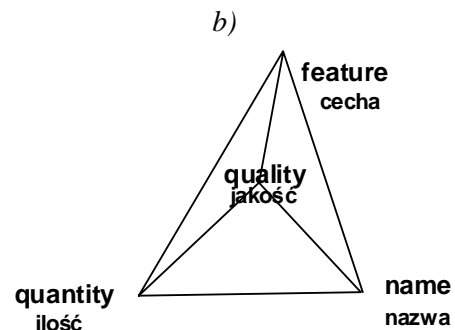
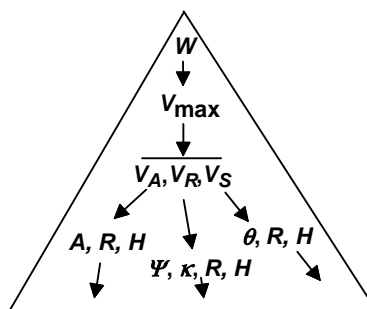


Fig. 6. Four principal families of features of a component of a separation system shown in a descriptive (a) and schematic (b) forms



Rys. 7. Cecha główna separacji jest wynikiem istnienia innych cech. Tworzą one hierarchiczną strukturę. Przypadek separacji metodą koagulacji. Cechą główną jest współczynnik stabilności  $W$  zależny od  $V_{max}$  – bariery energetycznej, a ta od energii oddziaływań ( $V_A$  – dyspersyjnych,  $V_R$  – elektrostatycznych,  $V_S$  – strukturalnych).  $V_A$  zależy od stałej Hamakera ( $A$ ). Z kolei  $V_R$  zależy od  $\Psi$  – potencjału powierzchniowego i  $\kappa$  – grubości elektrycznej warstwy podwójnej.  $V_S$  zależy od  $\theta$  – kąta zwilżania.  $H$  oznacza odległość między ziarnami, a  $R$  promień ziarna

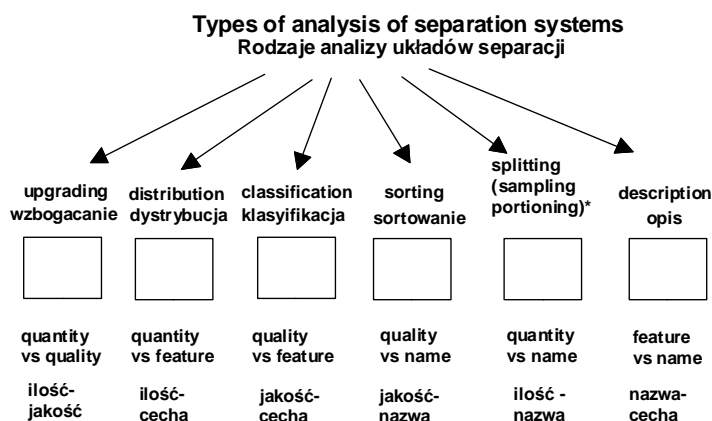
Fig. 7. The main feature utilized for separation is based on many other parameters. They form a hierarchical structure. The case of separation by coagulation. The main feature is stability ratio  $W$  resulting from  $V_{max}$  – energy barrier consisting of interactions energies ( $V_A$  – dispersion,  $V_R$  – electrostatic,  $V_S$  – structural).  $V_A$  depends on the Hamaker constant ( $A$ ).  $V_R$  depends on  $\Psi$  – surface potential and  $\kappa$  – electrical double layer thickness.  $V_S$  depends on  $\theta$  – contact angle.  $H$  stands for distance between particles and  $R$  for particle radius

### 3. Sposoby analizy wyników separacji

Posiadając informacje o czterech podstawowych cechach składnika (typ, ilość, jakość, główny parametr separacji) można utworzyć różne kombinacje tych cech. Istnieje 6 różnych sposobów analizy wyników separacji w formie par parametrów. Niektóre z nich już przedyskutowano w rozdziale 2.1 (jako rozdział, pobieranie próbek, porcjowanie) podczas gdy inne, nazwane jako rzeczywista separacja, będą omawiane w następnym rozdziale.

### 3. Approaches used for analysis of separation results

Having information on four principal features of a component (type, quality, quantity, separation parameter) one can create different pairs of the features. It is possible to use six different ways (pairs) of analysis of results of separation. Some of them already have been discussed in section 2.1 (splitting, sampling, portioning) while others, referred there to as the real separations, will be discussed in the next section.



Rys. 8.

Typy analizy układów separacji powstałe przez utworzenie par opartych na czterech rodzinach cech separacji (typ, ilość, jakość, cecha główna).

\* Pobieranie i porcjowanie próbek występują w układach, gdy nie ma w nich sił porządkujących

Fig. 8.

Types of analysis of separation system created by considering one pair formed from four families of features (type, quality, quantity, and main separation parameter).

\* Sampling and portioning are for systems when the ordering forces do not operate

### 4. Graficzna prezentacja wyników separacji

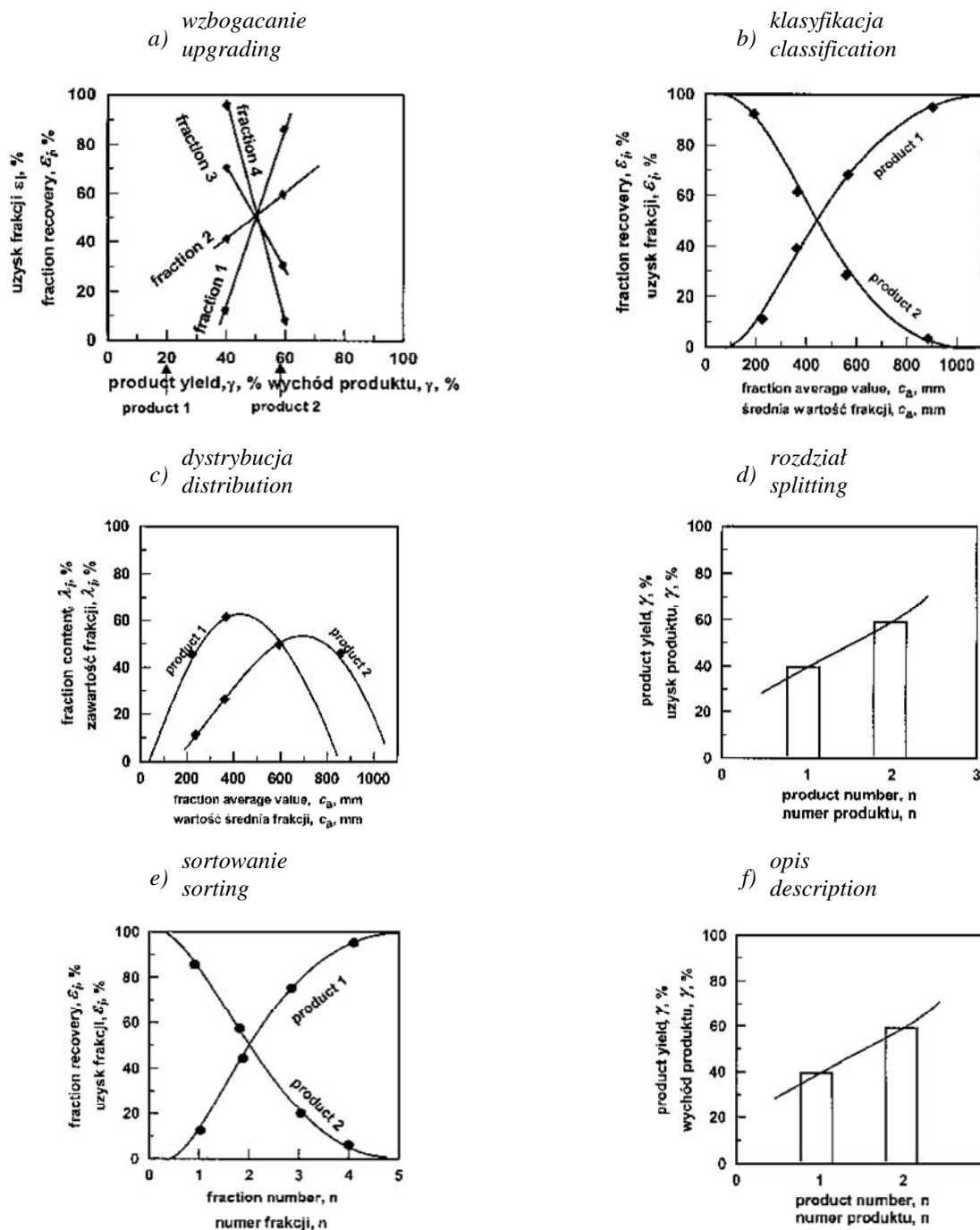
Rozpatrzmy przypadek separacji, kiedy początkowy składnik (nadawa) mający stały skład poddano separacji na dwa główne składniki (produkty) dzięki pewnej sile rozdzielającej. Wielkość siły porządkującej netto była stała. Produkty zawierały różne ilości składników pierwotnych nazwanych klasami ziarnowymi o określonych rozmiarach ziaren. Wyniki separacji były charakteryzowane przez określenie ilości produktów (wychody) oraz ich jakości (uzysk składników w produkcie). Produktom i składnikom przypisano różne nazwy. Wyniki separacji wykreślono jako wzbogacanie, klasyfikacja, rozdział, sortowanie, dystrybucja oraz opis. Ponieważ jest więcej danych niż mogą zmieścić osie wykresu kartezjańskiego, pozostałe informacje są zamieszczane albo w polu rysunku lub w tabeli towarzyszącej wynikom i zawierającej (nie pokazany w tej pracy) bilans separacji. Każdy wykres wiąże dwa parametry z listy dostępnych czterech: nazwa, ilość, jakość, cecha główna, i są one pokazane na rys. 9. Rysunek ten pokazuje wyniki w formie nieskumulowanej. Należy zauważyć, że każdy wykres może też być w formie skumulowanej lub modyfikowany w najróżniejszy

### 4. Graphical representation of separation data

We consider here a case of separation when an initial component (feed) having constant composition was separated into two main components (products) due to action of the splitting force. The magnitude of the net ordering force was constant. The products contained various amount of a primary components chosen here as size fractions of known numerical values. The results of separation were characterized by determining the quantity of the products (yield) and their quality (recovery of components in products). Different names were assigned to different products and components. The results of separation were plotted as upgrading, classification, distribution, splitting, sorting, and description. Since there are more data that can be accommodated on a two-parameter Cartesian plot axes, the additional data can be either included in the graph's legend or be presented in a table usually accompanying the results of separation and containing (not shown here) mass balances. The graphs relating each time two parameters from the list of four available, that is name, quality, quantity, main feature, are shown in Fig. 9. The graphs are presented in a non-cumulative forms. It

sposób np. przez użycie osi logarytmicznych (Kelly and Spottiswood, 1982) lub mnożenie przez różne parametry lub współczynniki (Drzymala 2001b, 2003, 2005; Konopacka i Drzymala, 2002).

should be noted that each type of plot can also be presented in a cumulative form as well as modified in variety of ways, for instance by using logarithmic scales (Kelly and Spottiswood, 1982) or multiplying by different parameters or factors (Drzymala 2001b, 2003, 2005; Konopacka and Drzymala, 2002).



Rys. 9. Różne sposoby, które mogą być zastosowane do analizy wyników separacji (formy nieskumulowane): a) wzbogacanie (ilość -jakość), b) klasyfikacja (jakość -wartość cechy), c) dystrybucja (ilość-wartość cechy), d) rozdział (ilość-nazwa), e) sortowanie (jakość-nazwa), f) opis (wartość cechy głównej-nazwa). Do sporządzenia rysunków użyto hipotetycznych wartości

Fig. 9. Different approaches that can be used for analysis of separation results (non-cumulative forms): a) upgrading (quality vs. quantity), b) classification (quality vs. feature value), c) distribution (quantity vs. feature value), d) splitting (quantity vs. name), e) sorting (quality vs. name), f) description (feature value vs. name). Not real values were used for plotting the graphs



## 5. Podsumowanie

Z tej pracy wynika, że jest możliwe zarysowanie struktury procesu separacji biorąc pod uwagę takie elementy jak siły i składniki separacji oraz ich właściwości. Z kolei analiza wyników separacji może być oparta o grupowanie właściwości składników na cztery rodziny tj. nazwa, ilość, jakość, wartość cechy głównej wykorzystywanej do separacji. Grupowanie to dostarcza sześciu dwuparametrycznych sposobów, które mogą być użyte do analizy układów separacji i ich wyników. Zostały one nazwane jako wzbogacanie, klasyfikacja, dystrybucja, rozdział, sortowanie oraz opis. Zaproponowane podejścia są proste i pozwalają na lepsze rozumienie separacji oraz umożliwiają ocenę i porównywanie wyników separacji w różnych układach.

## Podziękowania

Praca ta była częściowo finansowana z badań statutowych w Instytucie Górnictwa Politechniki Wrocławskiej (zlecenie 342-605).

## 5. Conclusions

It results from this work that it is possible to outline the structure of separation taking into account such elements as forces and components of separation as well as their properties. On the other hand the analysis of separation results can be based on grouping the properties of components of separation systems into four families that is name, quality, quantity, and the value of main separation feature which was utilized for separation. Such classification provides six different two-parameter ways that can be used for analysis of separation systems and their results. In this work they were named as upgrading, classification, distribution, splitting, sorting and description. The proposed approaches are simple and provide a better understanding of separation and improve evaluation and comparison of different separation systems.

## Acknowledgement

This work was partially financed by a Statutory Research Grant from the Polish Government through the Institute of Mining Engineering registered as grant 342-605.

## Literatura — References

1. Barskij, L.A., Rubinstein, Y.B., 1970. *Cybernetic methods in mineral processing*, Nedra, Moscow, in Russian.
2. Drzymała, J., 2001a. *Podstawy mineralurgii (Foundations of mineral processing)*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
3. Drzymała, J., 2001b. *Generating upgrading curves used for characterization separation processes (Generowanie krzywych wzbogacania stosowanych do charakteryzowania procesów separacji)* *Inżynieria Mineralna – Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, II, 2(4), 35–40.
4. Drzymała, J., 2003. *Sorting as a procedure of evaluating and comparing separation results*, *Physico-chemical Problems of Mineral Processing – Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii*, 37, 19–26.
5. Drzymała, J., 2005. *Evaluation and comparison of separation performance for varying feed composition and scattered separation results*, *Int. J. Miner. Process.*, 75, 189-196.
6. Kelly, E.G., Spottiswood, D.J., 1982. *Introduction to mineral processing*, Wiley, New York.
7. Konopacka, Ż., Drzymała, J., 2002. *Generowanie krzywych klasyfikacji stosowanych do opisu procesów separacji*, *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej* 96, *Konferencje No. 32*, 25-43, in Polish.