

# Bilansowanie równań reakcji redoks z wykorzystaniem wzorów sumarycznych

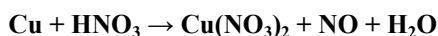
Bilansowanie równań redoks doczekało się licznych omówień, zarówno w publikacjach poświęconych dydaktyce chemii [1-3], jak i na portalach internetowych [4-6].

**Określanie współczynników stechiometrycznych równań reakcji, zapisanych z uwzględnieniem wzorów sumarycznych, a także zawierających reagenty, w których trudno jest ustalić stopień utlenienia pierwiastków, może stworzyć problemy trudne do rozwiązania preferowanymi w szkole metodami: bilansu elektronowego i bilansu jonowo-elektronowego. Równania wielu reakcji, które uczeń powinien zbilansować, zapisywane są zazwyczaj w postaci jonowej, rzadziej zaś w formie wzorów sumarycznych.**

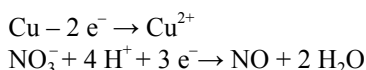
Mariusz Łukaszewski  
Leonard Nowakowski

Czy można zatem efektywnie bilansować równania reakcji redoks zapisanych z wykorzystaniem jedynie wzorów sumarycznych (tj. „w formie cząsteczkowej”, nazywanej tak zwyczajowo w wielu podręcznikach) metodą niewykorzystującą stopni utlenienia, inną niż prosta metoda intuicyjna lub mało popularna w szkole (choć uniwersalna) metoda algebraiczna?

Przyjrzyjmy się reakcji metalicznej miedzi z rozcieńczonym kwasem azotowym(V). Produktami powstającymi w tej reakcji są azotan(V) miedzi(II) oraz tlenek azotu(II):



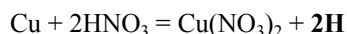
Bilansowanie tego równania metodą zmian stopni utlenienia (bilansu elektronowego) oraz metodą materiałowo-ładunkową (jonowo-elektronową) zostało szczegółowo opisane w podręczniku chemii Krzysztofa Pazdro [7]. Metoda materiałowo-ładunkowa dzieli równanie wyjściowe na dwa równania połówkowe (1):



Analizując sposób bilansowania równania wyjściowego można łatwo zauważyć, że brakujące po którejś ze stron równania połówkowego liczby atomów tlenu uzupełniane są cząsteczkami wody, a brakujące atomy wodoru - jonami wodorowymi  $\text{H}^+$ , których ładunek elektryczny wyrównywany jest odpowiednią liczbą elektronów  $\text{e}^-$ , tak aby obie strony równania połówkowego zapewniały przestrzeganie prawa zachowania ładunku. Można więc założyć, że przy bilansowaniu równań redoks zapisanych z użyciem wzorów sumarycznych liczba jonów wodorowych będzie równa liczbie elektronów przekazywanych akceptorowi (utleniacz) przez donor (reduktor). Spróbujmy zatem zbilansować reakcję miedzi z kwasem azotowym(V) pomijając w zapisie jony  $\text{H}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  i elektrony jako osobno występujące indywidua. Równanie wyjściowe zapisane z użyciem

wzorów sumarycznych podzielmy na dwa równania cząstkowe, uwzględniające reagenty reakcji ulegające przekształceniom. Azotan(V) miedzi(II) mógł powstać tylko w reakcji tego metalu z kwasem azotowym(V). Równanie cząstkowe ma zatem postać (pamiętajmy, że symbole H reprezentują tu atomy wodoru w znaczeniu formalnym, tj. jako pomocnicze indywidua, niezbędne na etapie bilansowania liczby atomów w równaniu cząstkowym):

## równanie cząstkowe 1

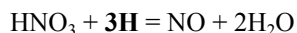


Tlenek azotu(II) mógł powstać tylko z kwasu azotowego(V), co prowadzi do odpowiedniego równania cząstkowego:

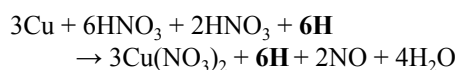
## równanie cząstkowe 2



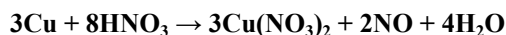
Brakujące po prawej stronie dwa atomy tlenu uzupełnione zostają dwiema cząsteczkami wody. Po lewej stronie tego równania występuje tylko jeden atom wodoru, po prawej mamy cztery atomy tego pierwiastka. Aby wyrównać liczbę atomów wodoru po obu stronach równania, po stronie lewej zapisujemy trzy atomy wodoru:



Dla wyrównania liczby atomów wodoru, pierwsze równanie mnożymy przez 3, drugie przez 2. Po wymnożeniu, zsumowaniu stronami obu równań i uporządkowaniu otrzymanego równania, otrzymujemy końcową postać równania wyjściowego:



Po odjęciu indywiduów **H** od obu stron równania otrzymamy ostatecznie:



Przedstawiony sposób bilansowania tego, w zasadzie prostego, równania reakcji stworzył przesłankę do prób

zastosowania tej metody do bilansowania bardziej rozbudowanych równań reakcji chemicznych, w których występuje większa liczba reagentów.

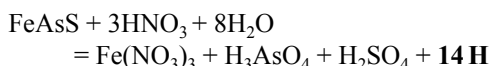
## Reakcje z udziałem związków nieorganicznych

### Przykład 1

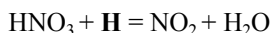
Reakcją mogącą wywołać u uczniów trudności z poprawnym i szybkim zbilansowaniem jest równanie przedstawiające działanie kwasu azotowego(V) na arsenopiryty FeAsS (**[8]**, s. 8) Produktami tej reakcji są azotan(V) żelaza(III), kwas ortoarsenowy(V), kwas siarkowy(VI) oraz tlenek azotu(IV):



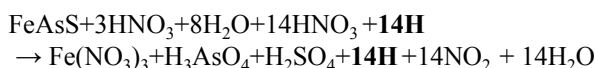
Na podstawie zapisu równania wiemy, że arsenopiryty w reakcji z kwasem azotowym(V) utworzył związki chemiczne zawierające trzy pierwiastki tj. żelazo w postaci azotanu(V) żelaza(III), arsen jako kwas arsenowy(V) i siarkę w postaci kwasu siarkowego(VI). Nie są znane natomiast stopnie utlenienia siarki, żelaza i arsenu w arsenopiryty. Z zapisu równania wyjściowego można wywnioskować postać pierwszego równania cząstkowego:



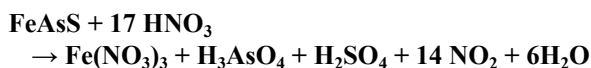
Jedynym związkiem chemicznym mogącym przekształcić się w tlenek azotu(IV) jest kwas azotowy(V). Równanie cząstkowe uwzględniające ten proces ma postać:



Celem wyrównania liczby atomów wodoru w obu równaniach drugie równanie należy pomnożyć przez 14, a następnie oba równania zsumować stronami:

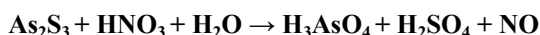


Po ostatecznym uporządkowaniu otrzymujemy :

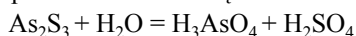


### Przykład 2

Równania reakcji na pozór łatwe do zbilansowania mogą stwarzać w rzeczywistości trudności w doborze współczynników stechiometrycznych. Przyjrzyjmy się zatem równaniu reakcji siarczku arsenu As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> z kwasem azotowym(V) [9]:



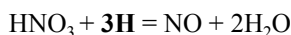
W tej reakcji równania cząstkowe można określić intuicyjnie. Siarczek arsenu(III) w reakcji z kwasem azotowym(V) może utworzyć tylko dwa związki zawierające arsen i siarkę. Zapis pierwszego równania cząstkowego posiada zatem formę:



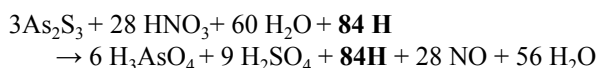
Wyrównujemy liczby atomów arsenu i atomów siarki, następnie po obu stronach równania wyrównujemy liczby atomów tlenu i wodoru. Równanie cząstkowe po zbilansowaniu ma postać:



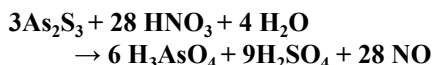
Jednym z produktów reakcji przytoczonej reakcji wyjściowej jest tlenek azotu(II). Związek ten może powstać tylko z kwasu azotowego(V). Drugie równanie cząstkowe posiada zatem prostą formułę :



Wyrównujemy liczby atomów wodoru w obu równaniach cząstkowych, mnożąc pierwsze równanie przez 3 a drugie przez 28. Sumujemy stronami oba równania:



Po uporządkowaniu, zbilansowane równanie przyjmuje postać:

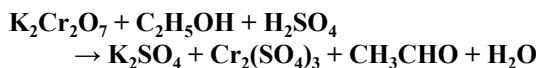


Na pierwszy rzut oka równanie to wydawało się łatwe do rozwiązania. W rzeczywistości jego zbilansowanie wymagało wyliczenia dużych wartości współczynników stechiometrycznych.

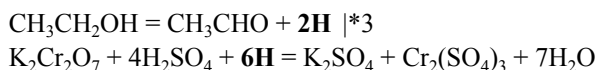
## Reakcje z udziałem związków organicznych

### Przykład 3

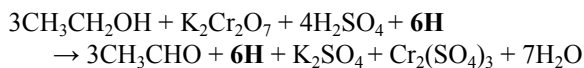
Jedno z zadań postawionych uczniom w podręczniku chemii „To jest chemia 2” ([4], s.164) dotyczyło otrzymania etanal w reakcji etanolu z dichromianem(VI) potasu w środowisku kwasu siarkowego(VI). Produktami reakcji są także siarczan(VI) potasu, siarczan(VI) chromu(III) i woda. Zadaniem uczniów było dokonać bilansu tego równania metodą bilansu elektronowego.



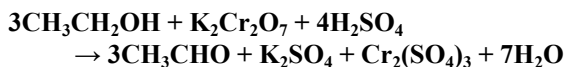
Przyjrzyjmy się możliwości zbilansowania tego równania bez posługiwania się zapisem transferu elektronów pomiędzy pierwiastkami. Analizując zapis reakcji chemicznej można zauważyć, że dichromian(VI) potasu w reakcji z kwasem siarkowym(VI) przekształca się w siarczan(VI) chromu(III) i siarczan(VI) potasu. Etanol natomiast przekształca się w wyniku reakcji w etanal (aldehid octowy). Wykorzystując założenia prezentowanej metody problem bilansowania równania sprowadzić można do dwóch równań cząstkowych:



Po wyrównaniu liczb atomów tlenu i wodoru oraz zsumowaniu obu równań stronami otrzymujemy:

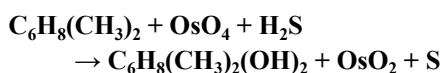


Po uporządkowaniu równanie ma postać:

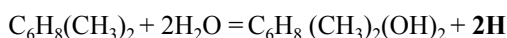


#### Przykład 4

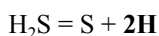
1,2-dimetylocykloheksen w reakcji z tlenkiem osmu(VIII) i siarkowodorem tworzy 1,2-dimetylocykloheksan-1,2-diol [10]. W tej reakcji tlenek osmu(VIII) ulega redukcji do OsO<sub>2</sub>(IV), natomiast siarka z siarkowodoru ulega utlenieniu do wolnego pierwiastka:



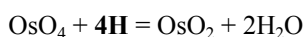
Pierwsze równanie cząstkowe to przekształcenie 1,2-dimetylocykloheksenu w 1,2-dimetylocykloheksan-1,2-diol:



Drugie równanie cząstkowe to utrata dwóch atomów wodoru przez siarkowodor



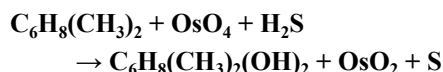
Trzecie równanie to przekształcenie tlenku osmu(VIII) w tlenek osmu(IV)



Reakcja wyjściowa jest o tyle ciekawa, że dla zbilansowania równania wymagane jest uwzględnienie indywidualności **H** występujących w trzech równaniach cząstkowych. W pierwszym równaniu cząstkowym po prawej stronie znajdują się dwa atomy wodoru. Taka sama liczba atomów wodoru znajduje się po prawej stronie drugiego równania cząstkowego. W trzecim równaniu cząstkowym po jego lewej stronie zostały zapisane cztery atomy wodoru.

Aby ustalić łączną liczbę atomów wodoru występujących po lewej stronie, musimy wiedzieć jak otrzymać poprawną kombinację liniową równania pierwszego i drugiego, w tym upewnić się, czy narzucające się ich mechaniczne zsumowanie jest jedynym rozwiązaniem (w ogólności nie musi tak być, por. [3]). W tym przypadku odpowiedzi dostarczają nam rozważania stechiometryczne, z których wynika, iż przyłączenie 2 grup –OH do wiązania podwójnego w cząsteczce 1,2-dimetylocykloheksenu jest równoznaczne z dostarczeniem 2 atomów tlenu z OsO<sub>4</sub> oraz 2 atomów wodoru z H<sub>2</sub>S. Oba te związki, jako wyłączne źródła odpowiednio: tlenu i wodoru, są powiązane jednoznacznie relacją stechiometryczną 1:1. Relacja ta zostanie zachowana jedynie w przypadku zsumowania równania pierwszego i drugiego wziętych z identycznymi współczynnikami liczbowymi, tj. również jak 1 do 1. W przeciwnym razie na etapie koniecznego wyrównania liczby atomów wodoru po stronie produktów i substratów nie udałoby się uzgodnić liczby atomów poszczególnych pierwiastków w równaniu wyjściowej reakcji.

Po prawidłowym zsumowaniu tych trzech równań cząstkowych, usunięciu z obu stron identycznych liczb atomów wodoru i cząsteczek wody, otrzymamy ostateczną postać równania wyjściowego:



#### Uwagi końcowe

Prezentowany w tym materiale sposób bilansowania równań reakcji redoks wykorzystuje podział równania wyjściowego na równania cząstkowe, w których wykorzystuje się wyłącznie wzory sumaryczne reagentów. Równania te, tak samo jak fikcyjne równania połówkowe, mogą nie odzwierciedlać rzeczywistych reakcji chemicznych, ale są wygodnym sposobem bilansowania, uwzględniającym powiązane ze sobą reagenty. Stąd dla odróżnienia zapisów reakcji cząstkowych od reakcji rzeczywistych w równaniach opisujących przemiany zastosowano znak „=”.

Znak „→” stosowany jest w zapisie równań określających rzeczywiste reakcje chemiczne. Przykłady przytoczone w materiale są tylko częścią szeregu równań reakcji chemicznych wykorzystanych do oceny skuteczności prezentowanej metody. Trzeba jednak zaznaczyć, że jak każda metoda bilansowania równań reakcji chemicznych, tak i ta posiada ograniczenia w jej stosowaniu.

Widzimy, iż prawa zachowania materii oraz ładunku elektrycznego są podstawą wszystkich metod bilansowania równań reakcji chemicznych. Poprawność matematyczna jest niewątpliwie kryterium koniecznym prawidłowego bilansu, jednak nie należy nigdy tracić z oczu wiedzy empirycznej o budowie reagentów i o chemicznej istocie opisywanych przekształceń substancji. Wiedza ta pozostaje niezbędna podczas interpretacji fizycznej otrzymanych rozwiązań i pozwala odróżnić pewne umowne, pomocnicze pojęcia (np. stopień utlenienia) i zapisy (np. równania cząstkowe), będące wyrazem przyjętych konwencji, od obserwowalnych, tj. dostępnych eksperymentalnie, właściwości materii (np. ładunek jonu, skład pierwiastkowy związku chemicznego) i jej przemian.

dr Mariusz Łukaszewski  
mgr Leonard Nowakowski

#### Literatura i materiały źródłowe

- [1] Łukaszewski M, Paleska I., Bilansowanie równań reakcji redoks, „Chemia w Szkole”, 2018, 334(3),40-46.
- [2] Łukaszewski M, Paleska I., Bilansowanie równań reakcji redoks-część 2, „Chemia w Szkole”, 2018, 336(5),32-39.
- [3] Łukaszewski M.,Paleska I, Bilansowanie równań reakcji a wybór metody rachunkowej, „Chemia w Szkole”, 2022,360(5), 36-45.
- [4] [http://chemfan.pg.gda.pl/Dydaktyka/Rownania\\_ReakcjiChemicznych\\_1.html](http://chemfan.pg.gda.pl/Dydaktyka/Rownania_ReakcjiChemicznych_1.html)
- [5] [http://chemfan.pg.gda.pl/Dydaktyka/Rownania\\_ReakcjiChemicznych\\_2.html](http://chemfan.pg.gda.pl/Dydaktyka/Rownania_ReakcjiChemicznych_2.html)
- [6] [http://chemfan.pg.gda.pl/Dydaktyka/Rownania\\_ReakcjiChemicznych\\_3.html](http://chemfan.pg.gda.pl/Dydaktyka/Rownania_ReakcjiChemicznych_3.html)
- [7] Krzysztof M. Puzdro, Chemia fundamenty, Podręcznik do liceów i techników, Zakres rozszerzony, Oficyna Edukacyjna\*Krzysztof Puzdro, Warszawa, 2015 s.
- [8] [http://www.kchn.pg.gda.pl/didactics/skrypt\\_cw/trozdzial4.pdf](http://www.kchn.pg.gda.pl/didactics/skrypt_cw/trozdzial4.pdf)
- [9] Chmurzynski L., Gleich E., Myszk H., Nesterowicz M, Smieta K, Widernik T., Obliczenia z chemii ogólnej, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk, 2015 s. 88.
- [10] Jurowski K., Jurowska A., Krzeczowska, M. Stopień utlenienia atomów (C,N,S,O i P) w związkach organicznych oraz reakcje utleniania-redukcji w chemii organicznej i biochemii, Wydawnictwo Scientae et Didactics, Kraków, 2015 s.228