

Dr inż. Tomasz Chmielewski  
Politechnika Wroclawska  
Wydział Chemiczny  
Zakład Chemii Analitycznej  
i Metalurgii Chemicznej

## AUTOREFERAT DO WNIOSKU HABILITACYJNEGO OPIS DOROBKU NAUKOWEGO

**1. IMIĘ I NAZWISKO: Tomasz Chmielewski**

**2. POSIADANE DYPLOMY I STOPNIE NAUKOWE**

DOKTORAT

1982 Politechnika Wroclawska

Wydział Chemiczny

Instytut Chemii Nieorganicznej i Metalurgii Pierwiastków Rzadkich

Uzyskany stopień: Doktor Nauk Chemicznych

Promotor: prof. dr hab. inż. Witold Charewicz

Tytuł rozprawy doktorskiej: „*Intensyfikacja procesu ługowania siarczkowego koncentratu miedzi w świetle badań elektrochemicznych*”

DYPLOM UKOŃCZENIA STUDIÓW

1973 Politechnika Wroclawska

Wydział Chemiczny

Instytut Chemii Nieorganicznej i Metalurgii Pierwiastków Rzadkich

Specjalność: Chemia i Metalurgia Pierwiastków Rzadkich

Uzyskany stopień: magister inżynier

Promotor: dr inż. Franciszek Łętowski

Tytuł pracy magisterskiej: „*Badania zastosowania elektrody  $Pb, PbSO_4/SO_4^{2-}$  w wodnych roztworach w temperaturach do 523K*”

STOPIEŃ GÓRNICZY

Dyrektor Górniczy III Stopnia – nadany przez Ministra Gospodarki 6. listopada 2014

**3. INFORMACJE O ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH**

10.1982 – obecnie,

Politechnika Wroclawska, Wydział Chemiczny

Stanowisko: adiunkt

10.1976 – 09.1982

Politechnika Wroclawska, Wydział Chemiczny

Stanowisko: starszy asystent

01.1974 – 09.1976

Politechnika Wrocławska, Wydział Chemiczny

Stanowisko: asystent

02. 1989 – 07. 1990

Iowa State University, Ames Laboratory, Ames USA

Stanowisko: postdoctoral fellow

07.1994 – 12. 1994

University of the Witwatersrand

Department of Metallurgy and Materials Engineering

Stanowisko: senior lecturer

#### **4. PEŁNIONE FUNKCJE ZWIĄZANE Z DZIAŁALNOŚCIĄ NAUKOWĄ I DYDAKTYCZNA**

1. Lider WP4 (Hydrometallurgy) w projekcie BIOSHALE (*Search for a sustainable way of exploiting black shale ores using biotechnologies*) realizowanym w latach 2004-2007 w ramach VI FP (kierowanie badaniami hydrometalurgicznymi w projekcie)
2. Recenzent monografii pt. „Łupek Miedzionośny” (cz. I), red. J.Drzymała i P.B.Kowalczyk, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2014
3. Członek Sekcji Wykorzystania Surowców Mineralnych Komitetu Górnictwa PAN (od 2007)
4. Członek Rady Redakcyjnej czasopisma *Physicochemical Problems of Mineral Processing* (IF = 0.862)
5. Recenzent prac zgłoszonych do druku w czasopiśmie: *Physicochemical Problems of Mineral Processing* (IF = 0.862); ok. 30 recenzji
6. Kierownik projektu HYDRO „*Technologia hydrometalurgicznego przetwarzania koncentratów i półproduktów miedzi*” finansowanego ze środków NCBiR w ramach inicjatywy Ini-Tech (2010-2013)
7. Recenzje wniosków badawczych do NCBiR – 3 recenzje
8. Stopień górniczy (Dyrektor Górniczy III Stopnia) – nadany przez Ministra Gospodarki 6. listopada 2014
9. Kierownik Projektu Edukacyjnego „Młody Chemik Eksperymentuje” realizowanego na Wydziale Chemicznym Politechniki Wrocławskiej od 28 lat

#### **5. AKTYWNOŚĆ W POZYSKIWANIU ŚRODKÓW NA BADANIA NAUKOWE**

1. Projekt BIOSHALE: “*Search for a sustainable way of exploiting black shale ores using biotechnologies*” realizowany w latach 2004-2007 w ramach VI FP (przygotowanie wniosku badawczego i realizacja badań)

2. Projekt HYDRO „*Technologia hydrometalurgicznego przetwarzania koncentratów i półproduktów miedzi*” finansowany ze środków NCBiR w ramach inicjatywy IniTech (2010-2013) (przygotowanie wniosku badawczego i realizacja badań)
3. Projekt HYDRO.pl “*Development of an innovative hydrometallurgical technology for production of non-ferrous metals from KGHM concentrates*”, finansowany ze środków NCBiR I KGHM w ramach inicjatywy CuBr (opracowanie wniosku)

## 6. UDZIAŁ W PROJEKTACH BADAWCZYCH

**HYDRO** – projekt finansowany ze środków NCBiR w ramach przedsięwzięcia IniTech w latach 2010-2013, kierownik projektu

**BIOSHALE** – projekt finansowany ze środków Komisji Europejskiej w ramach VI Projektu Ramowego w latach 2004 - 2007, lider WP4 (Work Package 4) – Hydrometallurgy.

## WPROWADZENIE

W styczniu 1974 roku, po ukończeniu studiów magisterskich na Wydziale Chemicznym Politechniki Wrocławskiej z zakresu „Chemia i Metalurgia Pierwiastków Rzadkich”, rozpocząłem pracę na Politechnice Wrocławskiej w ówczesnym Instytucie Chemii Nieorganicznej i Metalurgii Pierwiastków Rzadkich.

W październiku 1974 zostałem zatrudniony w charakterze asystenta naukowo-badawczego w Zakładzie Hydrometalurgii, kierowanym przez doktora Franciszka Łętowskiego. Od początku mojej pracy w Zakładzie Hydrometalurgii, aż do obrony pracy doktorskiej w czerwcu 1982, zajmowałem się zagadnieniami związanymi z podstawami procesów hydrometalurgicznych, zwłaszcza procesami ciśnieniowej regeneracji czynnika ługującego na bazie żelaza (utlenianie Fe(II) do Fe(III) tlenem pod ciśnieniem), ciśnieniowym ługowaniem siarczków oraz elektrochemicznymi badaniami podstaw procesów flotacji i ługowania na elektrodach siarczkowych.

Wyniki moich badań wykonanych w tym okresie zostały wykorzystane w pracy doktorskiej i były przedmiotem patentu oraz zostały opublikowane w krajowych i międzynarodowych czasopismach naukowych. W czerwcu 1982 roku obroniłem pracę doktorską nt. „*Intensyfikacja procesu ługowania siarczkowego koncentratu miedzi w świetle badań elektrochemicznych*”, uzyskując tytuł doktora nauk chemicznych. Po doktoracie pracę naukową kontynuowałem w Zakładzie Hydrometalurgii pod kierownictwem prof. Witolda Charewicza.

Mój dorobek naukowy, po uzyskaniu stopnia doktora, obejmuje działania naukowe i badawcze związane z fizykochemicznymi podstawami procesów flotacyjnego wzbogacania siarczkowych rud miedzi ze złóż Legnicko-Głogowskiego Zagłębia Miedziowego (LGOM). Badania dotyczyły procesów elektrochemicznych na elektrodach siarczkowych oraz przetwarzania rud miedzi i ich koncentratów, półproduktów i odpadów powstających w procesach flotacyjnego wzbogacania metodami hydrometalurgicznymi. Głównym celem moich prac było sprawdzenie, czy jest możliwe zwiększenie odzysku miedzi, srebra i niklu i ołowiu poprzez przerób hydrometalurgiczny wyselekcjonowanych produktów pochodzących z polimetalicznych siarczkowych rud miedzi eksploatowanych ze złóż LGOM-u oraz sprawdzenie, czy możliwe jest częściowe odzyskiwanie innych cennych metali użytecznych, które w obecnie stosowanych technologiach są nieodzyskiwane (Zn, Co, Mo, V).

Efektom moich wieloletnich badań hydrometalurgicznych było opracowanie podstaw i zastosowanie w skali przemysłowej (ZWR Polkowice) tak zwanej hybrydowej metody przerobu rudy miedzi polegającej na chemicznej modyfikacji za pomocą kwasu siarkowego produktu

łupkowego występującego w ZWR Lubin i kierowaniu go do dalszej flotacji. Wyznaczono parametry operacji jednostkowych tego procesu i założeń technicznych tej technologii. Ponadto, opracowano sposób hydrometalurgicznego przerobu ubogich koncentratów flotacyjnych, obejmującej odzyskiwanie z nich miedzi oraz metali towarzyszących takich jak Ag, Pb, Co i Ni.

W ostatnich latach uczestniczyłem w badaniach w ramach kierowanego przeze mnie projektu HYDRO nad zastosowaniem hydrometalurgii do odzyskiwania miedzi i metali towarzyszących (Ag, Pb, Co, Ni, Zn, Mo, V) zawartych w koncentratów końcowych produkowanych w ZWR Lubin, a także w tak zwanych koncentratów wysokouzyskowych oraz w wybranych produktach flotacji z obiegów wzbogacania ZWR Lubin.

Moje osiągnięcie naukowe, które jest przedmiotem wniosku habilitacyjnego, stanowi monotematyczny cykl 23 publikacji.



## Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe

Tytuł osiągnięcia naukowego:

### Odzysk miedzi oraz metali towarzyszących z polimetalicznych siarczkowych rud miedzi ze złóż Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego z udziałem metod hydrometalurgicznych

Rudy miedzi pochodzące z Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM) wykazują szereg unikalnych właściwości. Związane jest to z ich bardzo skomplikowaną genezą. W rudach LGOM obecne są trzy frakcje litologiczne: węglanowa, łupkowa i piaskowcowa. Każda z tych frakcji cechuje się specyficznymi i odmiennymi właściwościami oraz różnym stopniem rozproszenia składników użytecznych. Dlatego frakcje węglanowa, łupkowa i piaskowcowa odmiennie zachowują się w procesach wzbogacania rudy na drodze flotacji. Powoduje to komplikacje podczas flotacyjnego wzbogacania rudy, zwłaszcza jej frakcji łupkowej. Ponadto, osadowy charakter polskiej rudy miedzi powoduje, że jej składniki płonne w znacznej mierze stanowią węglany wapnia i magnezu, kwarc oraz minerały ilaste, w których rozproszone są siarczki miedzi i innych metali użytecznych. Fizyczne uwolnienie bardzo drobnych ziaren składników użytecznych, występujących w formie minerałów siarczkowych, w procesach rozdrabniania jest przez to trudne.

Niepełne uwalnianie ziarn minerałów siarczkowych podczas mielenia powoduje, że ich zrosty ze składnikami płonnymi mogą przechodzić do odpadu flotacyjnego. Gorsza wzbogacalność frakcji łupkowej oraz trudności w uwalnianiu minerałów użytecznych od płonnych są przyczyną niepełnego uzysku metali w koncentracie flotacyjnym. Dotyczy to zwłaszcza miedzi i srebra, które decydują o wartości ekonomicznej wydobywanej rudy.

Innym zagadnieniem jest dopasowanie technologii przerobu i wzbogacania do właściwości rudy. Stosowane w świecie technologie hydrometalurgicznego przetwarzania siarczkowych rud miedzi są zawsze dedykowane do surowca o określonym składzie mineralogicznym i chemicznym. Dlatego nie istnieje jedna, uniwersalna dla wszystkich surowców miedziowych, technologia hydrometalurgiczna. Znane technologie hydrometalurgiczne dla siarczkowych surowców miedzionośnych (rud, koncentratów, półproduktów), zarówno te znajdujące się na etapie badań, jak też stosowane w skali komercyjnej, uwzględniają przede wszystkim specyfikę surowca: skład mineralogiczny siarczków miedzi w surowcu, zawartość miedzi i innych metali (głównie Ag i Au oraz Ni, Co, Zn i innych). Muszą też one brać pod uwagę rodzaj minerałów płonnych i stopień rozproszenia w nich metalonośnych minerałów użytecznych. Decydującym o wyborze

technologii jest też zastosowanie właściwego środowiska ługowania, które może być siarczanowe, chlorkowe, czy też mieszane siarczanowo-chlorkowe. Istotny jest także sposób ługowania, które może być atmosferyczne lub ciśnieniowe i może być prowadzone w obecności regulatorów pH oraz czynników kompleksujących. Dlatego prawidłowego wyboru technologii dla określonego surowca dokonać można jedynie na drodze systematycznych badań. Stąd moja działalność naukowo-badawcza po obronie pracy doktorskiej w znacznej mierze skoncentrowana była na badaniu i opracowywaniu procesów hydrometalurgicznych dedykowanych różnym produktom i półproduktom flotacyjnego przerobu rud LGOM. Wyniki tych badań i rozważań są przedmiotem wniosku habilitacyjnego.

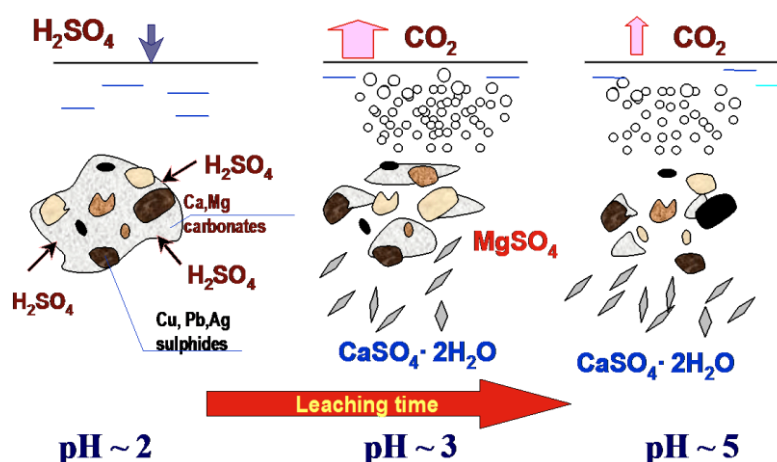
Należy jednak dodać, że w swojej pracy naukowo-badawczej zajmowałem się także badaniami podstawowymi związanymi z flotowalnością i podatnością na ługowanie siarczków miedzi i niektórych metali towarzyszących. Stosowałem metody elektrochemiczne, takie jak woltamperometria, chronoamperometria i pomiary potencjałów oraz prądów zwarcia na elektrodach półprzewodnikowych wykonanych z naturalnych siarczków metali pochodzących między innymi ze złóż rudy miedzi LGOM. W badaniach stosowałem układy modelowe, a ich celem było określenie warunków elektrosorpcji ksantogenianowych kolektorów flotacji, głównie etylowego ksantogenianu potasu, na siarczkach metali. Wyniki tych badań pozwoliły na ocenę elektrochemicznych parametrów elektrosorpcji kolektora ksantogenianowego (KEtX) na powierzchni badanych minerałów siarczkowych. Wykazano i wyjaśniono znaczące różnice w zachowaniu się wybranych siarczków, głównie galeny i pirytu, w procesach utleniania. Obserwowane różnice tłumaczono właściwościami elektrochemicznymi minerałów pochodzących z różnych złóż. Wyniki badań tego okresu zostały opublikowane w czasopiśmie o zasięgu krajowym i międzynarodowym oraz były prezentowane w formie referatów na konferencjach i publikowane w materiałach konferencyjnych. Ta część mojej działalności naukowej nie jest objęta wnioskiem habilitacyjnym.

## **I. Chemiczna modyfikacja półproduktów flotacji i wpływ kontrolowanego rozkładu węglanów na dalszy proces flotacji**

W oparciu o liczne prace badawcze wykonane samodzielnie oraz wspólnie z prof. Andrzejem Łuszczkiewiczem i jego współpracownikami z Zakładu Przeróbki Kopaliny i Odpadów Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej stwierdzono, że jedną z głównych przyczyn obniżonej skuteczności flotacji jest niedokładne uwolnienie ziaren siarczkowych minerałów użytecznych, głównych nośników miedzi i srebra, w strumieniach rudy kierowanych do flotacji, zwłaszcza we frakcji węglanowej i łupkowej. Stało się to podstawą propozycji niekonwencjonalnego sposobu zwiększania stopnia uwolnienia minerałów siarczko-



wych rozproszonych w ziarnach składników węglanowych rudy, polegającego na kontrolowanym chemicznym rozkładzie węglanów za pomocą kwasu siarkowego (rys. 1). Szczegóły nowego procesu omówiono w pracy [H 1] oraz rozwinięto w pracach [H 2] i [H 3]. Koncepcja tego procesu polega na wyprowadzeniu z obiegu technologicznego strumienia trudno wzbogalnego produktu pośredniego, zwanego także półproduktem łupkowym, poddaniu go ługowaniu kwasem siarkowym, po czym zawróceniu go z powrotem do układu flotacji. Proponowana chemiczna modyfikacja nadawy do flotacji oparta jest na wykorzystaniu dwóch reakcji chemicznych (1) i (2):

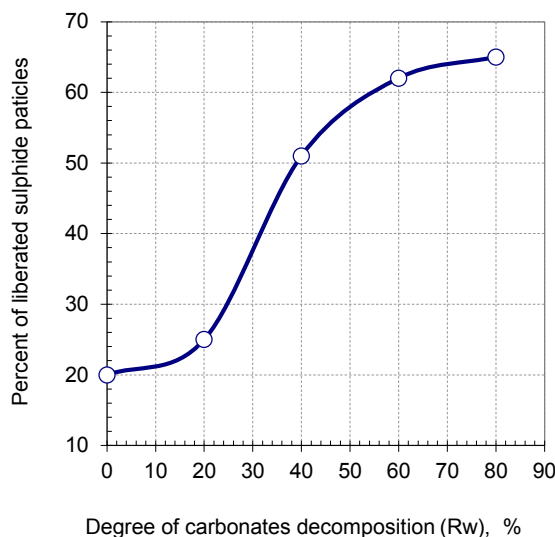


Rys. 1. Schemat chemicznego selektywnego rozkładu zrostów siarczkowo-węglanych podczas nieutleniającego ługowania za pomocą kwasu siarkowego produktu pośredniego przeznaczonego dalszej flotacji [H 1]

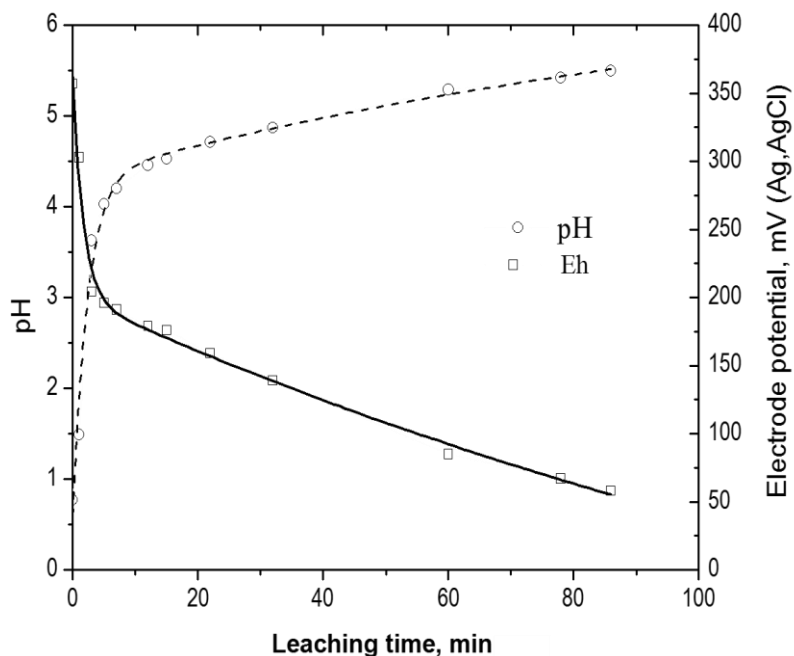
dzięki którym następuje rozkład węglanów wapnia i magnezu oraz uwolnienie minerałów siarczkowych tworzących zrosty z tymi węglanami. W wyniku reakcji tworzy się trudno rozpuszczalny gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) oraz rozpuszczalny w wodzie siarczan magnezu. Wydzielający się podczas reakcji ditlenek węgla ( $\text{CO}_2$ ) nasyca roztwór wodny, powodując znaczne obniżenie jego potencjału redoks (rys. 3), tworząc warunki nieutleniające procesu [H 6]. Jest to korzystne, gdyż niski potencjał redoks zabezpiecza przed roztwarzaniem się siarczków metali w środowisku silnie kwaśnym. Stwierdzono, że uwalnianie siarczków z matrycy węglanowej rośnie wraz ze wzrostem stopnia rozkładu węglanów [H 1, H 3] (rys. 2)

W badaniach laboratoryjnych wykazano, że w miarę postępu reakcji ługowania węglanów obserwuje się wzrost pH zawiesiny oraz znaczny spadek potencjału redoks zarówno zawiesiny (rys. 3) jak i potencjału siarczków w warunkach ługowania nieutleniającego. Aby proces chemicznej modyfikacji był prowadzony w sposób kontrolowany, opracowano ściśle procedury. Dotyczyły one przede wszystkim sposobu określania zawartości węglanowych składników płonnych w nadawie, których miarą jest jednostkowe zużycie kwasu siarkowego na całkowity

rozkład węglanów w modyfikowanej chemicznie materiale ( $Z_{max}^{H_2SO_4}$ ), oraz prowadzenia procesu ługowania węglanów w taki sposób, aby stopień ich rozkładu był zawsze stechiometrycznie niższy od 100% [H 1]. Obserwuje się wówczas wzrost pH zawiesiny wraz z postępem procesu, co umożliwia kontrolę jego szybkości w oparciu o pomiary pH w czasie reakcji (rys. 5) [H 1, H 2, H 3].



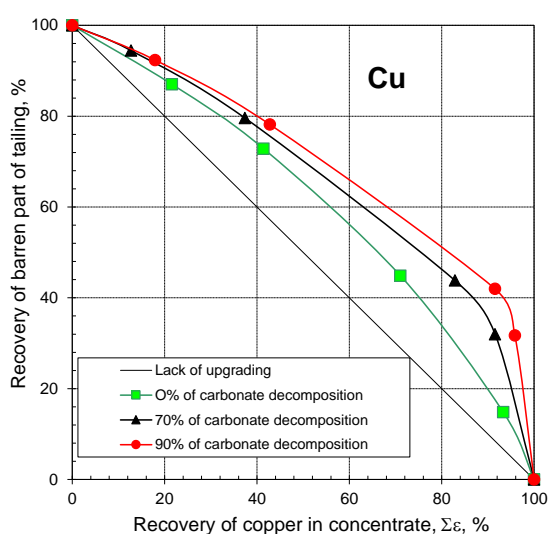
Rys. 2. Wpływ ługowania produktu pośredniego ZWR Polkowice kwasem siarkowym na stopień uwolnienia ziarn siarczków metali dla frakcji ziarnowej +0.044-0.075 mm ( [H 1, H 3] )



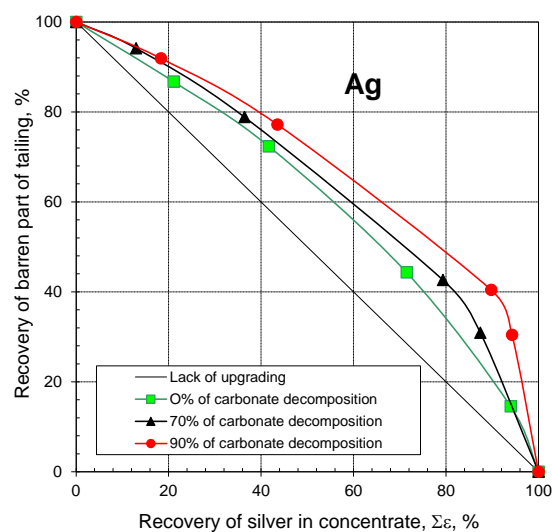
Rys. 3. Zmiany pH i potencjału redoks, mierzonego jako potencjał elektrody platynowej zawiesiny podczas nieutleniającego ługowania produktu pośredniego (półproduktu łupkowego) flotacji z ZWR Lubin. Stopień rozkładu węglanów wynosił 70% [H 6]

Zastosowany proces hydrometalurgiczny zapewnia wzrost wskaźników flotacji, zwłaszcza zawartości i uzysku metali w koncentratkach, wraz ze wzrostem stopnia rozkładu węglanów w modyfikowanym chemicznie produkcie pośrednim, będącym po modyfikacji nadawą do dalszej flotacji (rys. 4 i 5). Potwierdzono skuteczność procesu chemicznej modyfikacji i późniejszej flotacji dla różnych półproduktów obiegów technologicznych ZWR Lubin, ZWR Polkowice i ZWR Rudna [H 3, H 4, H 5].

Proces chemicznej modyfikacji półproduktów łupkowych z obiegu wzbogacania i późniejszej ich flotacji badano zarówno w skali laboratoryjnej, półtechnicznej jak i przeprowadzono weryfikację wyników badań skali przemysłowej [H 7].



Rys. 4. Wpływ stopnia rozkładu (0, 70 i 90%) węglanów w procesie chemicznej modyfikacji produktu pośredniego (odpadu I czyszczenia z ZWR Rudna) na uzysk miedzi w wyniku jego flotacji. Badania laboratoryjne [H 4]

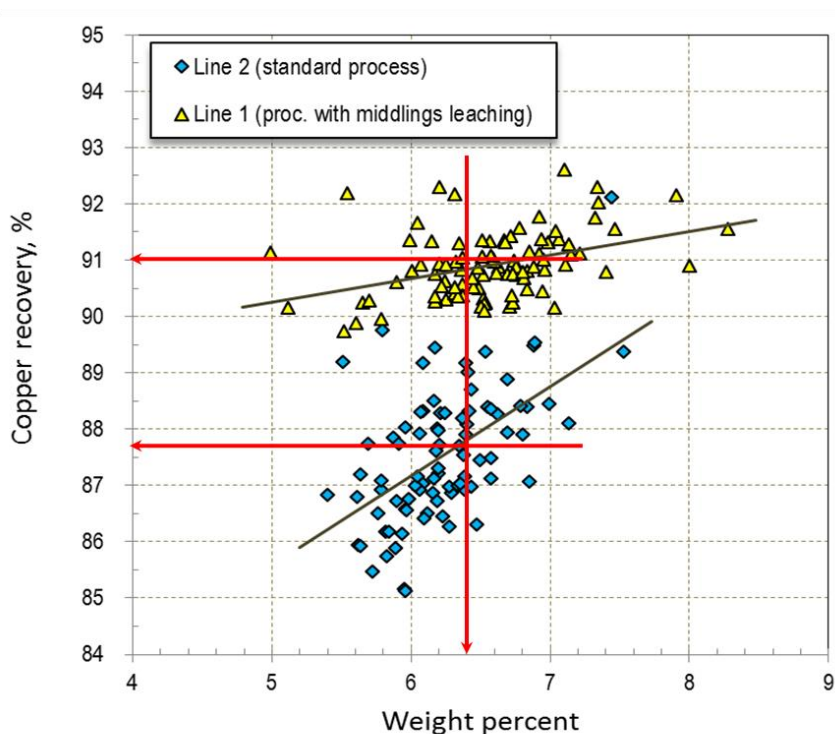


Rys. 5. Jak rys. 4- dane dla srebra

Efektom prowadzonych prac badawczych były publikacje poświęcone wyjaśnieniu mechanizmu selektywnego rozkładu węglanów w procesie chemicznej modyfikacji produktu pośredniego oraz ocenie wpływu tego procesu na wskaźniki jego flotacji od skali laboratoryjnej do przemysłowej. Proces chemicznej modyfikacji nadawy został wdrożony w skali przemysłowej w ZWR Polkowice, w newralgicznym węźle flotacji I czyszczącej, a jego skuteczność potwierdzono w oparciu o wzrost wskaźników końcowych flotacji (rys. 6) [H 7].

Wyniki statystycznej analizy końcowych wskaźników technologicznych dla dwóch niezależnie pracujących przemysłowych nitek technologicznych flotacji zasilanych jednakową nadawą w okresie jednego miesiąca pokazano na rysunku 6. Dane do tego wykresu stanowiły średnie wskaźniki finalne (uzysk Cu w funkcji wychodu koncentratu) zebrane w ciągu 30 dni 3-zmianowej pracy dwóch niezależnych układów technologicznych (nitek) zakładu wzbogacania. Pierwsza nitka technologiczna wyposażona była w węzeł chemicznej modyfikacji jednego z

trudno wzbogacalnych produktów pośrednich układu flotacji (odpad I czyszczenia), a druga nitka pracowała w układzie standardowym, bez modyfikacji, czyli bez chemicznego rozkładu węglanów. Kontrolowany w trakcie tego okresu stopień rozkładu węglanów strumienia produktu pośredniego pierwszej nitki wahał się w granicach od 65 do 85%.



Rys. 6. Porównanie statystyczne wyników przemysłowych równoległych nitek technologicznych flotacji: 1 – z ługowaniem (stopień rozkładu węglanów: 65 - 85%), 2 – standardowa bez ługowania (ZWR Polkowice) [H 7]

Linie regresji pokazane na rys. 6 wskazują na znaczący wzrost uzysku w układzie technologicznym wyposażonym w operację chemicznej modyfikacji. Wyliczone średnie wskaźniki przy stałym wychodzie koncentratu wynoszącym średnio 6,2% wykazały większy o około 3,3% uzysk dla nitki wyposażonej w węzeł modyfikacji chemicznej, w stosunku do standardowej nitki bez modyfikacji, przy niemal identycznej, wyliczonej średniej jakości produkowanych w obu nitkach koncentratów miedziowych o zawartości 25,0% Cu. Okazało się, że uzysk miedzi w koncentracie przemysłowym wytwarzanym z nitki z węzłem modyfikacji był przeciętnie od 2,8% do 3,6% wyższy niż w standardowej nitce technologicznej bez modyfikacji.

Omawiane badania laboratoryjne i próby przemysłowe oraz ich wyniki opublikowano w następujących artykułach:

- H 1. Łuszczkiewicz Andrzej, **Chmielewski Tomasz**: *Technologia chemicznej modyfikacji produktów pośrednich w układach flotacji siarczkowych rud miedzi*, Rudy i Metale Nieżelazne, 2006, R. 51, nr 1, s. 2-10,  
**Punktacja MNiSW z 2010: 09**,  
Rodzaj pracy: artykuł; zasięg: lokalny  
Mój wkład w powstanie pracy polegał na wykonaniu serii eksperymentów chemicznej modyfikacji nadaw do flotacji (odpad I czyszczenia ZWR Lubin) przy różnych stopniach rozkładu węglanów, wspólnej analizie wyników i ich korelacji z uzyskanymi wskaźnikami flotacji. Wniosłem też istotny udział w opracowanie tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na **55%**.
- H 2. Konopacka Żaklina, Łuszczkiewicz Andrzej, **Chmielewski Tomasz**: *Effect of non-oxidative leaching on flotation efficiency of Lubin Concentrator*, Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2007, nr 41, s. 275-289, Lokalizacja elektroniczna: <http://www.dbc.wroc.pl/publication/12653>  
**Punktacja MNiSW z 2010: 06**,  
Lista Filadelfijska - T  
Rodzaj pracy: artykuł; zasięg: międzynarodowy  
Mój wkład w powstanie pracy polegał na wykonaniu serii eksperymentów chemicznej modyfikacji wybranych nadaw do flotacji (odpad I czyszczenia ZWR Lubin) przy różnych stopniach rozkładu węglanów, wykonaniu niezbędnych analiz roztworów i faz stałych, wspólnej analizie wyników i opracowaniu metody oceny wyników. Wniosłem też istotny udział w opracowanie tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na **60%**.
- H 3. Łuszczkiewicz Andrzej, **Chmielewski Tomasz**: *Acid treatment of copper sulfide middings and rougher concentrates in the flotation circuit of carbonate ores*, International Journal of Mineral Processing: 2008, vol. 88, nr 1/2, s. 45-52,  
Lokalizacja elektroniczna: <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2008.06.003>  
**Punktacja MNiSW z 2010: 32**,  
Lista Filadelfijska - T  
**IF - 1.017**  
Rodzaj pracy: artykuł; zasięg: międzynarodowy  
Mój wkład w powstanie pracy polegał na wykonaniu serii eksperymentów chemicznej modyfikacji wybranych półproduktów flotacji z obiegów wzbogacania KGHM przy różnych stopniach rozkładu węglanów, wykonaniu niezbędnych analiz roztworów i faz stałych, wspólnej analizie i opracowaniu wyników, opracowaniu metody oceny wyników flotacji w funkcji stopnia rozkładu węglanów i stopnia uwolnienia minerałów siarczkowych. Wniosłem też istotny udział w opracowanie tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na **60%**.
- H 4. **Chmielewski Tomasz**, Łuszczkiewicz Andrzej, Konopacka Żaklina: *Adic pretreatment of hard-to-treat copper ore flotation middlings to facilitate flotation efficiency*, in: Proceedings of XXIV International Mineral Processing Congress, IMPC 2008, Beijing, China, 24-28 September 2008 / ed. by Wang Dian Duo [i in.]. Beijing: Science Press, cop. 2008. s. 1189-1200,  
Rodzaj pracy: referat; zasięg: międzynarodowy,

Mój wkład w powstanie pracy polegał na wykonaniu serii eksperymentów chemicznej modyfikacji wybranych półproduktów flotacji przy różnych stopniach rozkładu węglanów, wykonaniu niezbędnych analiz roztworów i faz stałych, wspólnej analizie i opracowaniu wyników oraz opracowaniu metody oceny wyników flotacji w zależności od stopnia rozkładu węglanów. Wniosłem też istotny udział w opracowanie tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na **40%**.

H 5. **Chmielewski Tomasz**, Łuszczkiewicz Andrzej, Konieczny Andrzej: *Processing of hard-to-tread copper ore and flotation middlings using chemical treatment*, in: XXV International Mineral Processing Congress, IMPC 2010, 6-10 September 2010, Brisbane, Australia. Carlton Vict.: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, cop. 2010. s. 1799-1806, (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series; nr 7),

Rodzaj pracy: referat; zasięg: międzynarodowy,

Mój wkład w powstanie pracy polegał na wykonaniu serii eksperymentów chemicznej modyfikacji różnych półproduktów wzbogacania z obiegów flotacji ZWR Lubin i ZWR Polkowice i ich flotacji przy różnych stopniach rozkładu węglanów, wykonaniu niezbędnych analiz roztworów i faz stałych, wspólnej analizie i opracowaniu wyników oraz opracowaniu metody oceny wyników flotacji w zależności od stopnia rozkładu węglanów. Wniosłem też istotny udział w opracowanie tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na **50%**.

H 6. Kowalczyk Przemysław B, **Chmielewski Tomasz**: *Changes of electrode potential in the non-oxidative leaching*, Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2010, nr 44, s. 115-126, Lokalizacja elektroniczna: <http://www.minproc.pwr.wroc.pl/journal/pdf/2010/FPM%2044/KOWALCZUK,%20CHMIELEWSKI.pdf>

**Punktacja MNiSW z 2010: 13,**

Lista Filadelfijska - T

**IF - 0.406**

Rodzaj pracy: artykuł; zasięg: międzynarodowy

Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu programu badań, podstaw elektrochemicznych zachowania siarczków warunkach nieutleniającego ługowania węglanów, wykonaniu elektrod siarczkowych do pomiarów, interpretacji wyników pomiarów. Wniosłem też istotny udział w opracowanie tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na **50%**.

H 7. Łuszczkiewicz Andrzej, **Chmielewski Tomasz**, Konieczny Andrzej: *Leaching and flotation of concentrate and middlings in flotation circuits of carbonate - shale copper ores* W: XXVI International Mineral Processing Congress, IMPC 2012, New Delhi, India, September 24-28, 2012: conference proceedings /org. by Indian Institute of Mineral Engineers, The Indian Institute of Metals. [Bangalore, KA, India : Indian Institute of Science, 2012]. s. 3067-3075, Lokalizacja elektroniczna: [http://www.minproc.pwr.wroc.pl/zpkio/pdf/Aktualnosc/Luszczkiewicz\\_302.pdf](http://www.minproc.pwr.wroc.pl/zpkio/pdf/Aktualnosc/Luszczkiewicz_302.pdf), **udział: 50 %**

Rodzaj pracy: referat; zasięg: międzynarodowy.

Mój wkład w powstanie pracy polegał na wykonaniu analizy przemysłowych układów wzbogacania wybranych półproduktów flotacji i ich flotacji przy różnych stopniach rozkładu węglanów w obiegach bez i z chemiczną modyfikacją nadaw, wykonaniu analizy wyników flotacji w zależności od stopnia rozkładu węglanów w skali przemysłowej. Wniosłem też istotny udział w opracowanie tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na **50%**.



## II. Hydrometalurgiczne przetwarzanie półproduktu łupkowego (odpadu I czyszczenia) z obiegu wzbogacania ZWR Lubin

W opinii technologów KGHM badane w procesie modyfikacji chemicznej półprodukty łupkowe, jako trudno wzbogacalne, znacznie obciążają obiegi technologiczne i są jedną z głównych przyczyn obniżonego uzysku metali w koncentratkach flotacyjnych. Dlatego w trakcie weryfikacji przemysłowej opracowanego sposobu podwyższenia skuteczności flotacji przez prowadzenie procesu hybrydowego opartego na chemicznej modyfikacji wybranych produktów w obiegu wzbogacania rud miedzi za pomocą kwasu siarkowego jako czynnika głównie podnoszącego stopień uwolnienia ziarn minerałów siarczkowych z matrycy węglanowej, kontynuowałem badania w kierunku pełniejszego przerobu trudnych półproduktów flotacji.

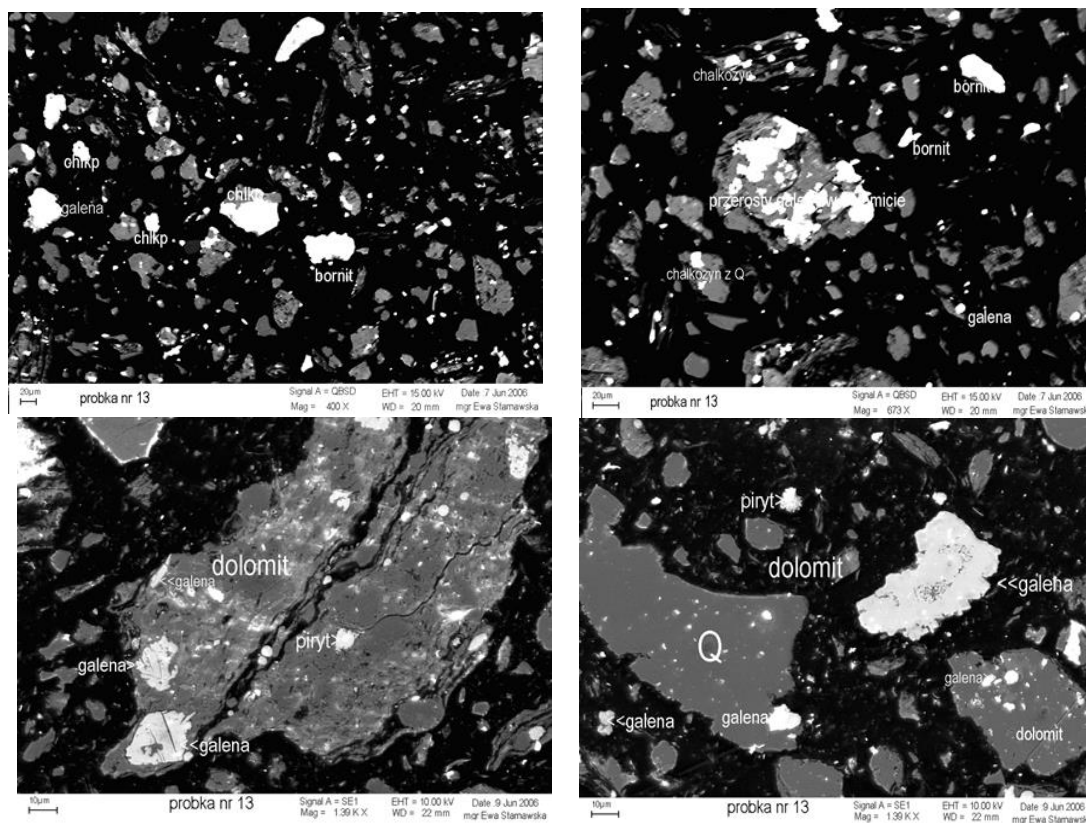
Nowa koncepcja moich badań polegała na wyprowadzeniu z obiegu procesu flotacji uciążliwych, trudno wzbogacalnych produktów pośrednich [H 4] i poddawaniu ich procesowi hydrometalurgicznemu. Do badań wytypowano i użyto odpad flotacyjny operacji I-czyszczenia powstający w ZWR Lubin. Do opracowania podstaw hydrometalurgicznego przerobu materiałów miedzionośnych wykorzystano pozyskaną dotąd wiedzę z zakresu wpływu unikalnego składu chemicznego i mineralogicznego polskiej rudy miedzi, w tym szczególnie półproduktów obiegu flotacji, na hydrometalurgiczny odzysk metali oraz wiedzę i doświadczenie z wcześniejszych badań podstawowych.

Tabela 1. Skład chemiczny półproduktu łupkowego w postaci odpadu I czyszczenia ZWR Lubin

Składnik, zawartość					
Cu, %	Fe, %	Ni, g/t	Co, g/t	Pb, %	As, %
2,72	1,76	374	572	1,51	0,09
Składnik, zawartość					
Ag, g/t	Zn, g/t	S <sub>c</sub> , %	S <sub>so4</sub> , %	C <sub>total</sub> , %	C <sub>org</sub> , %
190	1 200	2,95	1,45	14,30	8,96

W pierwszej kolejności w przeprowadzonych badaniach określono wpływ najważniejszych parametrów fizykochemicznych na wstępny proces rozkładu węglanów kwasem siarkowym, co nazwano ługowaniem nieutleniającym [H 13]. Następnie badano proces nazwany ługowaniem atmosferycznym [H 11], polegający na działaniu na wyprowadzony z obiegu technologicznego miedziowy półprodukt łupkowy kwasem siarkowym w obecności tlenu oraz jonów żelaza(III) w temperaturach poniżej 100 °C [H 13]. Równolegle, w innych publikacjach opisywano i analizowano koncepcje oraz rozwiązania zmierzające do podniesienia stopnia uzysku miedzi i me-

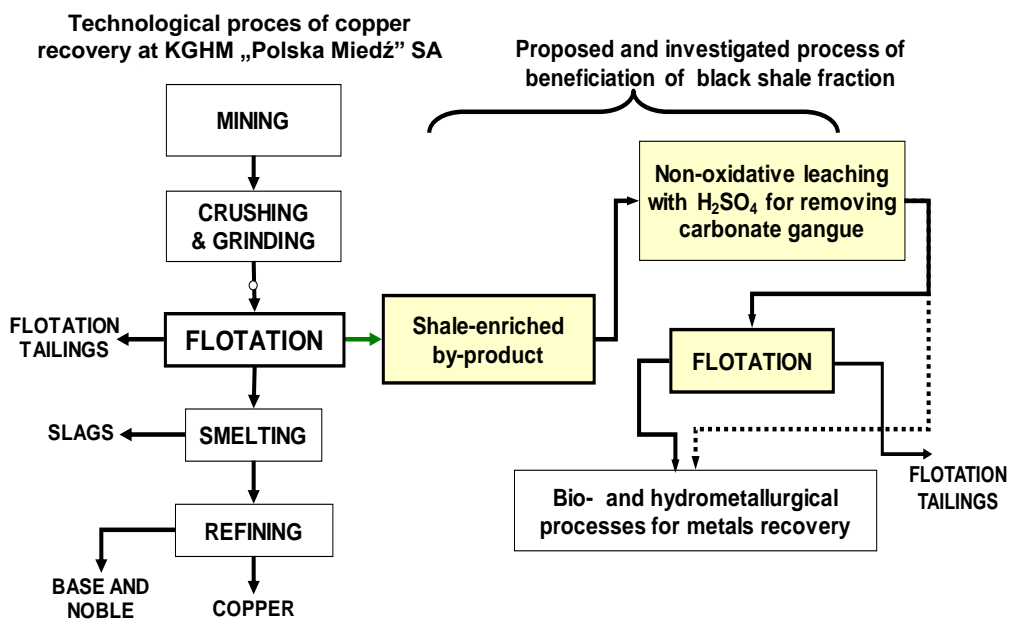
tali towarzyszących z rudy, półproduktów i koncentratów miedzi na drodze hydrometalurgicznej. Badania prowadzono w ramach projektu BIOSHALE realizowanego w latach 2004 - 2007 ze środków UE w ramach VI Projektu Ramowego.



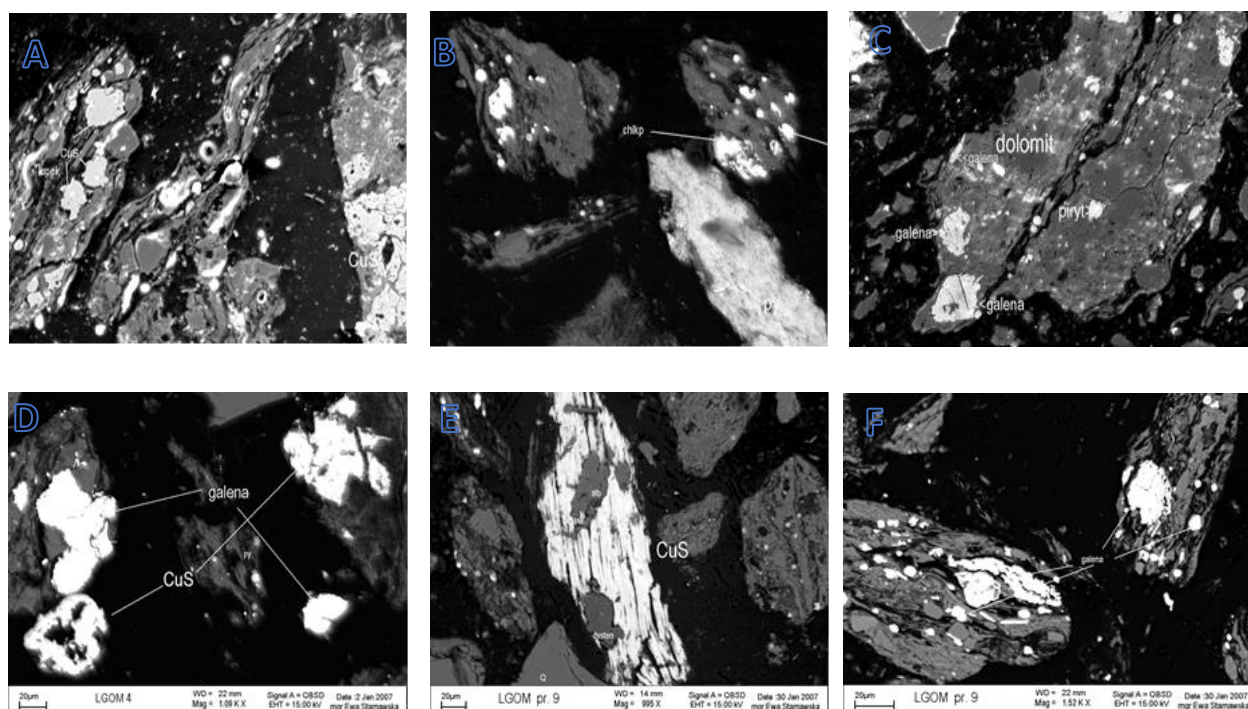
Rys. 7. Zdjęcia mikroskopowe techniką skaningową półproduktu łupkowego kumulującego się w obie-  
gach flotacji ZWR Lubin. Zdjęcie pokazuje rozproszenie siarczkowych minerałów użytecznych we  
frakcji łukowej i węglanowej [H 15]

Badania chemiczne i mineralogiczne półproduktu łupkowego wyprowadzonego z układu flota-  
cyjnego ZWR Lubin wykazały, że zawiera on tylko nieco poniżej 3% Cu, ale jest materiałem  
o wyraźnie podwyższonej koncentracji metali towarzyszących, zwłaszcza Ni, Co, Zn i Ag oraz  
węgla organicznego (tabela 1.) [H 10, H 11, H 13, H 14, H 15]. W opinii autora proponowany  
proces hydrometalurgiczny oparty o operacje chemicznego ługowania daje możliwość ekono-  
micznego odzysku dodatkowych metali z rudy LGOM-u. Wyprowadzenie z obiegu flotacji pół-  
produktu łupkowego i jego przerób hydrometalurgiczny ma dodatkową zaletę, gdyż produkt  
ten jest nośnikiem znaczącej części węgla organicznego krążącego w obiegu flotacji [H 4].  
Doprowadziłoby to do znaczącego obniżenia zawartości węgla organicznego w finalnym prze-  
mysłowym koncentracie miedziowym, co jest korzystne dla dalszego procesu hutniczego.





Rys. 8. Schemat koncepcji przetwarzania półproduktu łupkowego wydzielanego z obiegu flotacji ZWR Lubin (odpad I czyszczenia) stosowana podczas prac w ramach projektu BIOSHALE realizowanego ze środków UE w ramach VII Projektu Ramowego [H 11, H 13]



Rys. 9. Skaningowa analiza mineralogiczna półproduktu łupkowego ZWR Lubin przed (A, B, C) i po atmosferycznym ługowaniu utleniającym (D, E, F) [H11]. Zdjęcia ilustrują rozproszenie bardzo drobnych ziarn siarczków metali we frakcji łupkowej

Schemat koncepcji przetwarzania półproduktu łupkowego wydzielanego z obiegu flotacji ZWR Lubin (odpad I czyszczenia) pokazano na rysunku 8. Zakłada się, że roztwory zawierające

miedź i metale towarzyszące, powstające w procesach ługowania atmosferycznego lub ciśnieniowego, będą kierowane do oczyszczania i separacji składników użytecznych na drodze ekstrakcji rozpuszczalnikowej (SX) [H 12].

W czasie badań ługowania atmosferycznego stwierdzono, że część ziaren łupkowych, zwłaszcza te grubsze, nie ulegają chemicznemu rozkładowi nawet w warunkach ługowania atmosferycznego w natlenionych kwaśnych roztworach żelaza(III) (rys. 9) [H 11, 15]. Dlatego łupek w postaci opadu z I czyszczenia był też poddawany ługowaniu ciśnieniowemu w roztworach kwasu siarkowego w temperaturach od 120 do 180 °C i pod ciśnieniem tlenu od 0,25 do 1,0 MPa (tabela 2.) [H 14, H 15].

Tabela 2. Stopień odzysku metali w procesie ciśnieniowego ługowania produktu łupkowego w roztworze kwasu siarkowego pod ciśnieniem tlenu [H 15]

Próbka	Temperatura, °C	Ciśnienie parcjale tlenu, MPa	Stężenie H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , g/dm <sup>3</sup>	Stopień wylugowania metalu, %					
				Cu	Co	Fe	Ni	As	Zn
1.	100	0,5	50	68,8	8,1	6,6	6,2	8,1	87,5
2.	120	0,5	50	38,1	33,6	12,6	27,2	30,7	88,3
3.	140	0,5	50	98,8	80,3	70,3	28,2	50,3	97,5
4.	140	1,0	50	98,7	81,7	77,3	22,7	41,9	97,4
5.	140	0,75	50	98,9	82,5	83,6	36,2	50,5	97,4
6.	140	0,25	50	97,9	77,5	82,6	30,4	48,5	96,8
7.	140	0,5	20	98,2	82,9	38,5	39,3	44,0	96,7
8.	140	0,5	30	98,4	81,2	70,0	33,2	50,4	97,4
9.	140	0,5	40	98,6	79,3	79,5	32,8	51,5	97,2
10.	160	0,5	50	83,4	71,7	86,4	25,5	48,4	98,1
11.	180	0,5	50	89,8	78,6	69,4	29,1	45,8	98,2
12.	140	0,5	50	98,8	81,2	61,2	31,3	47,1	97,2
13.	140	0,5	50	98,3	80,2	78,5	26,8	52,8	96,6

Inne moje badania wykazały, że możliwe jest skuteczne ługowanie miedzi i metali towarzyszących z opadu I czyszczenia w roztworach amoniakalnych [H 14], w których metale te tworzą bardzo trwałe i dobrze rozpuszczalne kompleksy amoniakalne.

Wyniki badań nad hydrometalurgicznym przetwarzaniem produktu łupkowego procesu flotacji w ZWR Lubin opublikowano w podanych niżej pracach:

- H 10. **Chmielewski Tomasz:** *Non-oxidative leaching of black shale copper ore from Lubin mine*, Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2007, nr 41, s. 323-335, Lokalizacja elektroniczna: <http://www.ig.pwr.wroc.pl/minproc/journal/pdf/2007/323-335.pdf>  
**Punktacja MNiSW z 2010: 06,**  
Lista Filadelfijska - T  
Rodzaj pracy: artykuł; zasięg: międzynarodowy,  
Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu programu badań, analizie stopnia rozproszenia metali we frakcji łupkowej rudy miedzi, wykonaniu doświadczeń, opracowaniu kinetycznych zależności nieutleniającego ługowania frakcji łupkowej i elektrochemicznej kontroli procesu. Opracowałem tekst publikacji. Mój udział w pracy: **100%**.
- H 11. **Chmielewski Tomasz:** *Atmospheric leaching of shale by-product from Lubin Concentrator*, Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2007, nr 41, s. 337-348,  
Lokalizacja elektroniczna: <http://www.minproc.pwr.wroc.pl/journal/pdf/2007/337-348.pdf>  
**Punktacja MNiSW z 2010: 06,**  
Lista Filadelfijska - T  
Rodzaj pracy: artykuł; zasięg: międzynarodowy,  
Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu programu badań, przygotowaniu i chemicznej obróbce próbek frakcji łupkowej rudy miedzi, wykonaniu doświadczeń ługowania atmosferycznego i określeniu wpływu wybranych parametrów na ługowanie miedzi i metali towarzyszących. Opracowałem tekst publikacji. Mój udział w pracy: **100%**.
- H 12. Ochromowicz Katarzyna, **Chmielewski Tomasz:** *Solvent extraction of valuable metals from pregnant leach solutions of cupriferous shale*, Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2007, nr 41, s. 365-372,  
Lokalizacja elektroniczna: <http://www.ig.pwr.wroc.pl/minproc/journal/pdf/2007/365-372.pdf>  
**Punktacja MNiSW z 2010: 06, udział:**  
Lista Filadelfijska - T  
Rodzaj pracy: artykuł; zasięg: międzynarodowy,  
Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu programu badań, przygotowaniu rozwiązań po ługowaniu atmosferycznym frakcji łupkowej rudy miedzi do ekstrakcji. Współuczestniczyłem w opracowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na **50%**.
- H 13. **Chmielewski Tomasz,** Wódka Jerzy, Iwachów Łukasz: *Ammonia pressure leaching for Lubin shale middlings*, Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2009, nr 43, s. 5-20,  
Lokalizacja elektroniczna: [http://www.minproc.pwr.wroc.pl/journal/pdf/2009/FMP%2043/FPM\\_43\\_2009%20Chmielewski%20Wodka%20Iwachow.pdf](http://www.minproc.pwr.wroc.pl/journal/pdf/2009/FMP%2043/FPM_43_2009%20Chmielewski%20Wodka%20Iwachow.pdf)  
**Punktacja MNiSW z 2010: 06,**  
Lista Filadelfijska - T  
**IF - 0.355**  
Rodzaj pracy: artykuł; zasięg: międzynarodowy,

Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu programu badań, określeniu zakresu badanych parametrów, przygotowaniu, charakterystyce chemicznej i mineralogicznej próbek frakcji łupkowej rudy miedzi do ługowania amoniakalnego, analizie wyników eksperymentów. Znacząco uczestniczyłem w opracowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na **50%**.

H 14. Wódka Jerzy, **Chmielewski**, Tomasz, Ziółkowski Bogumił: *Pressure leaching of shale ore in oxygenated sulphuric acid*, Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2007, nr 41, s. 349-364, Lokalizacja elektroniczna: <http://www.ig.pwr.wroc.pl/minproc/journal/pdf/2007/349-364.pdf>

**Punktacja MNiSW z 2010: 06,**

Lista Filadelfijska – T

Rodzaj pracy: artykuł; zasięg: międzynarodowy.

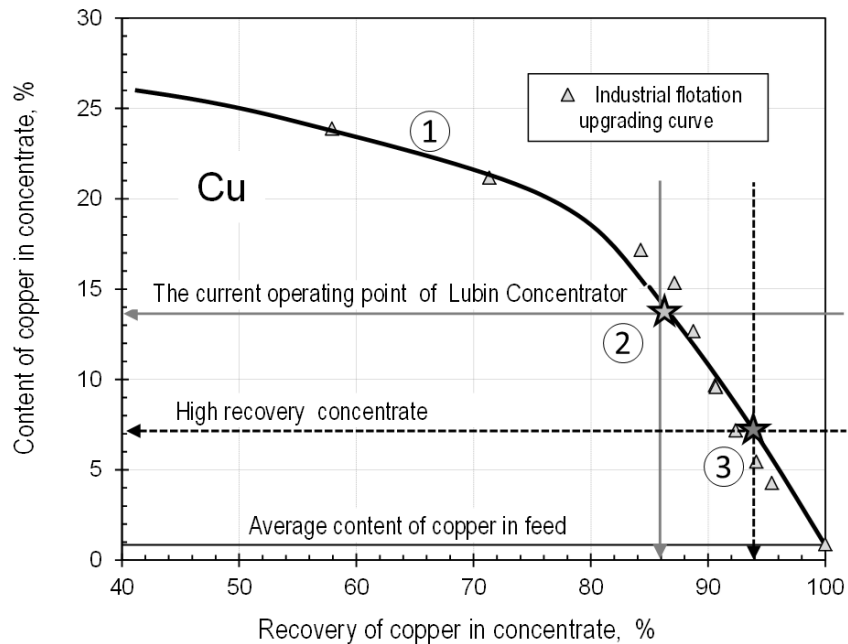
Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu programu badań, określeniu zakresu badanych parametrów, przygotowaniu, charakterystyce chemicznej i mineralogicznej próbek frakcji łupkowej rudy miedzi do ługowania ciśnieniowego, analizie wyników eksperymentów. Znacząco uczestniczyłem w opracowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na **50%**.

### III. Technologia hydrometalurgicznego przetwarzania koncentratów miedziowych

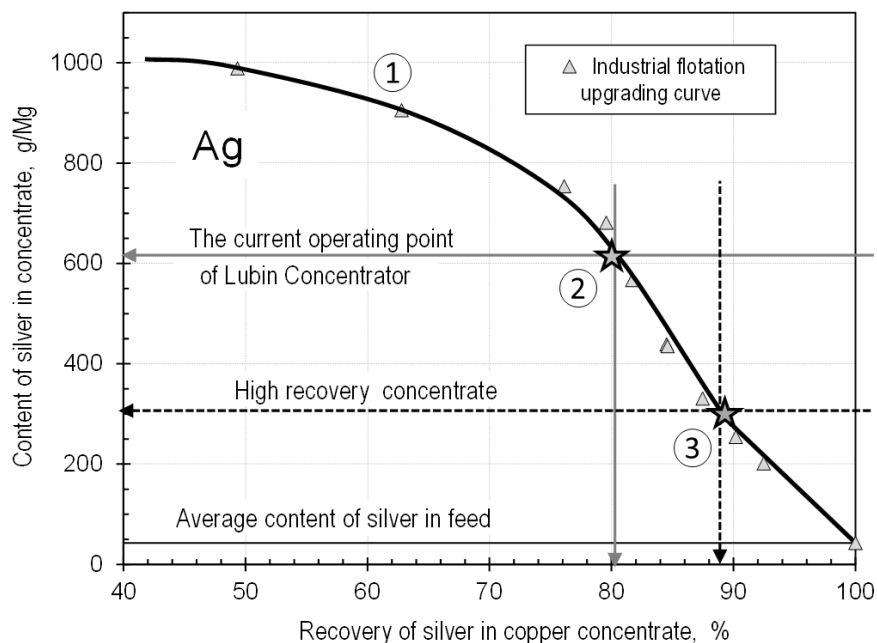
Hydrometalurgia może być zastosowana nie tylko do opisanego już procesu hybrydowego polegającego na chemicznej modyfikacji kwasem siarkowym produktów pośrednich i ich dalszego przerobu flotacyjnego, czy też ich pełnego chemicznego przetwarzania. Dlatego podjęto próbę hydrometalurgicznego przerobu różnych wariantów końcowego koncentratu miedziowego, w tym tak zwanego ubogiego oraz wysokouzyskowego. Skład mineralogiczny takich koncentratów jest korzystny dla procesu ługowania, między innymi z powodu dominującej mineralizacji chalkozynowo-bornitowej oraz obecności efektów galwanicznych wynikających z istniejących kontaktów między siarczkami, które prowadzą do intensyfikacji ługowania [H 17].

Dla realizacji celu opracowania podstaw hydrometalurgicznego przerobu flotacyjnych koncentratów miedziowych przygotowane zostały założenia i wnioski projektu badawczego finansowanego przez NCBiR w ramach inicjatywy IniTech. Projekt HYDRO - „*Technologia hydrometalurgicznego przetwarzania półproduktów i koncentratów miedzi*”, realizowany był w latach 2010 - 2013 i obejmował etap badawczy (2010-2012) i etap przygotowania do wdrożenia (2013). Trzyletni projekt HYDRO, kierowany przez autora, zakładał opracowanie parametrów ługowania miedzi i metali towarzyszących oraz opracowanie koncepcji technologii dla wybranych półproduktów i koncentratów miedzi.

W oparciu o szczegółową analizę procesu wzbogacania w ZWR Lubin, wykonaną dla realizowanego projektu HYDRO przez zespół pod kierunkiem prof. Andrzeja Łuszczkiewicza z Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej, do badań wytypowano dwa rodzaje nadawy do ługowania: koncentrat końcowy z bieżącej produkcji ZWR Lubin o zawartości Cu poniżej 14% oraz uzysku Cu 86 % oraz celowo wyprodukowany przez ZWR Lubin koncentrat nazwany wysokouzyskowym. Jest to koncentrat flotacyjny o obniżonej do około 7,5% zawartości miedzi (koncentrat ubogi), w którym uzysk miedzi, na podstawie przemysłowej charakterystyki wzbogalności w ZWR Lubin, wyniósłby około 94% (rys. 10), co spowodowałoby równocześnie i podniesienie uzysku srebra w tym koncentracie do ponad 89% (rys. 11). Analizy składu chemicznego koncentratu wysokouzyskowego wykazały, że mimo obniżenia w nim zawartości miedzi do około 7,4%, zawartość pozostałych metali towarzyszących byłaby taka sama lub porównywalna z zawartością w produkowanym w ZWR Lubin koncentracie końcowym (tabela 3 i 4). Dane te uzasadniały zatem wybór koncentratu wysokouzyskowego jako alternatywnej nadawy do ługowania [H 22, H 23].



Rys. 10. Krzywa wzbogacalności Cu dla procesu przemysłowego w I ciągu ZWR Lubin (1). Gwiazdkami zaznaczono aktualne wskaźniki pracy ZWR Lubin (2) i prognozowane wskaźniki (punkt pracy) po obniżeniu jakości koncentratu do poziomu koncentratu wysokouzyskowego (3) (~7,5 % Cu, uzysk Cu – 94%) [H 23]



Rys. 11. Krzywa wzbogacalności dla srebra. Dane jak na rys. 10

Istotą realizowanych w latach 2010 - 2013 badań nad koncepcją procesu hydrometalurgicznego przerobu wybranych lub specjalnych koncentratów flotacyjnych było zwiększenie stopnia odzysku miedzi i srebra oraz odzyskanie metali (Zn, Co, V, Mo) traconych w części lub całkowicie w dotychczas stosowanych w KGHM „Polska Miedź” S.A. technologiach opartych na flotacji, wytopie i rafinacji. Przyjęta w projekcie HYDRO koncepcja alternatywnej technologii



hydrometalurgicznej, oparta była na ługowaniu nieutleniającym (kontrolowany rozkład węglanów), atmosferycznym [H 16] i ciśnieniowym [H18] dla odzysku miedzi, cynku, niklu, kobaltu [H 20], wanadu i molibdenu oraz na ługowaniu chlorkowym dla odzysku srebra i ołowiu.

Tabela 3. Zawartość miedzi metali towarzyszących w koncentracie końcowym ZWR Lubin w latach 2009-2013

Year	Cu, %	Zn, %	Ni, g/t	Co, g/t	Ag, g/t	Pb, %	As, %	V, g/t	Mo, g/t
2009	15,85	0,947	415	1040	na	2,67	0,290	-	-
2010	15,26	0,928	488	1206	938	na	0,343	569	265
2011	14,56	0,570	483	1250	755	na	0,258	672	221
2012	13,98	0,712	461	1325	736	4,48	0,313	670	257
2013	12,87	0,740	494	1482	455	5,42	0,266	657	272

Tabela 4. Zawartość miedzi metali towarzyszących w koncentracie wysokouzyskowym ZWR Lubin

Cu	Zn	Ni	Co	Fe	Pb	Ag	As	V	Mo
%	%	g/t	g/t	%	%	g/t	%	g/t	g/t
7,42	0.436	498	1251	5.09	4,94	429	0,161	942	292

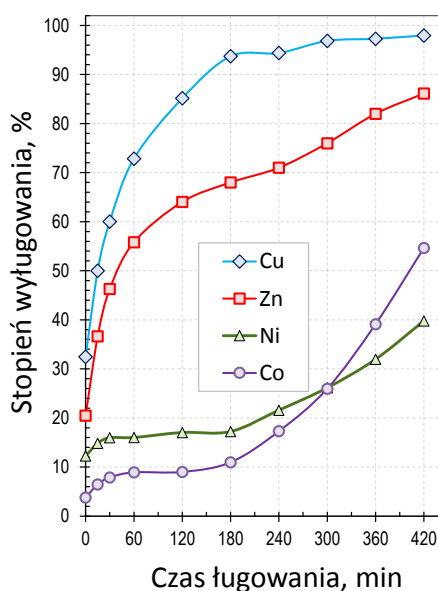
Do oczyszczania roztworów po ługowaniu i do separacji odzyskiwanych metali z tych roztworów przewidziano operacje ekstrakcji rozpuszczalnikowej (SX) [H 19]. W przypadku wariantu zastosowania koncentratu wysokouzyskowego jako nadawy do ługowania zakładano możliwość wzrostu odzysku miedzi z koncentratów pochodzących z ZWR Lubin od około 4 do 6%. Koncepcję technologii hydrometalurgicznej w odniesieniu do innych wariantów zmian technologicznych omówiono w publikacji [H 22].

Wykonane badania mineralogiczne (mineralogia optyczna i instrumentalna, zwana MLA), analizy chemiczne i wcześniejsze testy laboratoryjne wykazały, że zasadniczy proces utleniającego ługowania metali w warunkach atmosferycznych lub ciśnieniowych musi, podobnie jak przy przerobie poprzednio opisanych produktów pośrednich, być poprzedzony kontrolowanym rozkładem węglanów na drodze selektywnego ługowania nieutleniającego za pomocą kwasu siarkowego. Wykazano, że z zawiesiny po ługowaniu nieutleniającym możliwa jest separacja gipsu na drodze flotacji oraz wydzielenie siarczanu magnezu z roztworu i skierowanie go do procesu odzysku tego metalu [R 1].

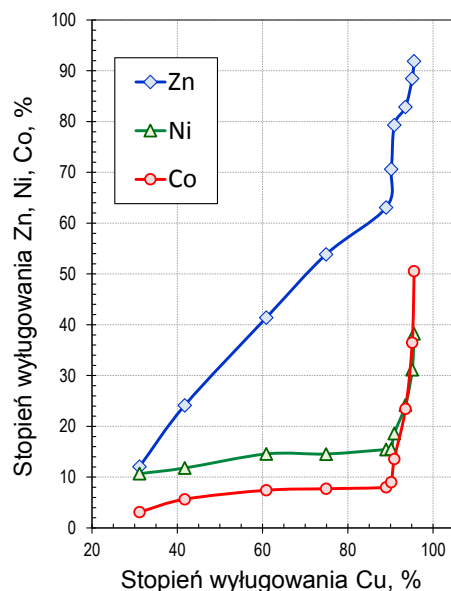
Do zasadniczego ługowania miedzi i towarzyszących jej metali tworzących siarczki, jako czynnik ługujący wybrano natlenione roztwory kwasu siarkowego w obecności jonów żelaza(III) jako utleniacza. Wybór roztworów kwasu siarkowego do ługowania wynikał z dostępności tego

czynnika i jego niskiej ceny. Istotnym był też aspekt ekologiczny wyboru kwasu siarkowego jako ługowania. Kwas siarkowy jest bowiem czynnikiem ługującym, który w stosunkowo najmniejszym stopniu niekorzystnie wpływa na środowisko.

W badaniach dotyczących kinetyki ługowania atmosferycznego i ciśnieniowego potwierdzono korzystne dla hydrometalurgii unikalne cechy badanych koncentratów. Te cechy to: dominująca mineralizacja chalkozynowo – bornitowa, niska zawartość chalkopirytu oraz korzystna dla ługowania obecność pirytu i węgla organicznego. Obecność mineralnych zrostów, będących przyczyną efektów galwanicznych zwiększających szybkość ługowania [H 17] powoduje, że materiały te są bardzo przydatne jako nadawa do procesów ługowania, w przeciwieństwie do dominujących w świecie pierwotnych koncentratów chalkopirytowych, wykazujących niską podatność na ługowanie.



Rys. 12. Kinetyka atmosferycznego ługowania Cu, Zn, Co i Ni (90°C, Fe(III) 30 g/l, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 50 g/l, przepływ tlenu 60 l/h). Dane dla koncentratu końcowego ZWR Lubin [H 20]

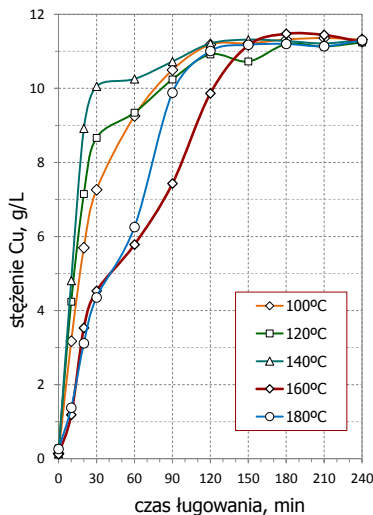


Rys. 13. Zależność stopnia wyługowania Zn, Ni, Co od stopnia wyługowania Cu w ługowaniu atmosferycznym. Parametry jak na rys. 12 [H 20]

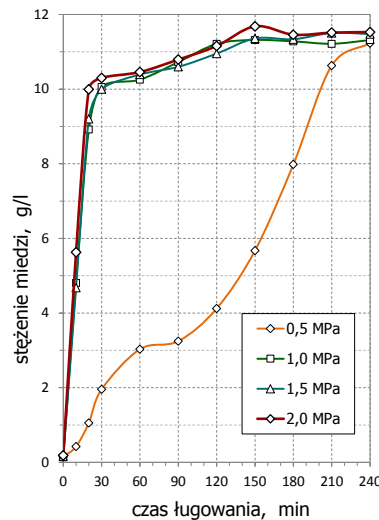
Wykonane badania kinetyki ługowania oraz stopnia odzysku metali z koncentratu produkowanego w ZWR Lubin pozwoliły określić wpływ najważniejszych parametrów na proces ługowania atmosferycznego (temperatura, stężenie kwasu siarkowego, stężenie żelaza(III), szybkość przepływu tlenu, stosunek faz, czas ługowania, wielkość uziarnienia nadawy) oraz wyjaśnić mechanizmy ługowania w różnych zakresach badanych parametrów [H 16]. Uzyskane dotychczas wyniki wykazały, że miedź i cynk znajdujące się w uwolnionych ziarnach lub w zrostach z innymi minerałami siarczkowymi ługują się bardzo dobrze w czasie około 6 – 7 godzin (rys. 12) [H 17]. Wykazano, że kobalt i nikiel są rozproszone w sieci krystalicznej siarczków miedzi i ich intensywne ługowanie rozpoczyna się dopiero po chemicznym uwolnieniu minerałów tych metali podczas ługowania miedzi (rys. 13) [H 21].



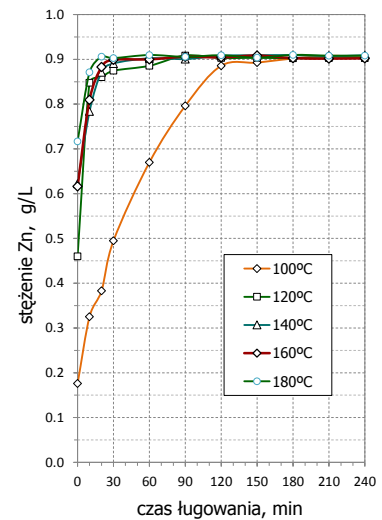
W badaniach sprawdzono również wariant ługowania ciśnieniowego koncentratów miedzi w temperaturach od 140 do 180°C i pod ciśnieniem tlenu od 0,5 do 2,0 MPa (rys. 14, 15, 16) [H 18]. Jest to operacja bardzo intensywna, umożliwiającą znaczne skrócenie czasu ługowania miedzi i cynku do poniżej 2 godzin oraz uzyskanie wysokiego stopnia uzysku innych metali towarzyszących. Jedynie stopień wylugowania niklu był na poziomie około 50% (rys. 17).



Rys. 14. Wpływ temperatury na szybkość ciśnieniowego ługowania miedzi ( $p_{O_2} = 0.5 \text{ MPa}$ )



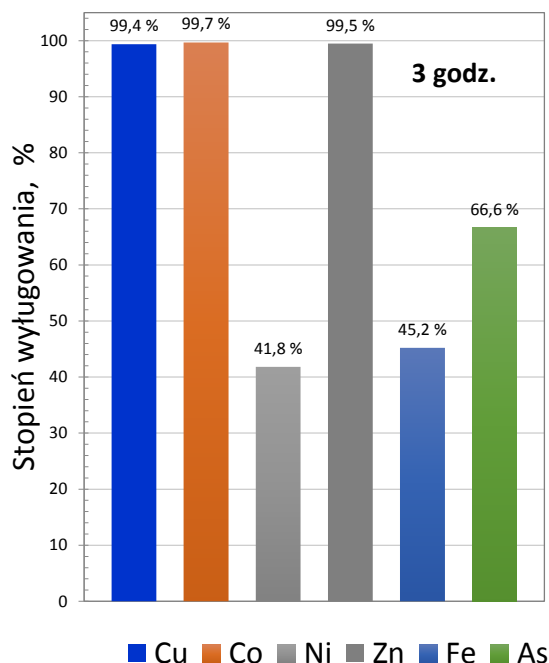
Rys. 15. Wpływ ciśnienia tlenu na szybkość ciśnieniowego ługowania miedzi (temp. 140°C)



Rys. 16. Wpływ temperatury na szybkość ciśnieniowego ługowania cynku ( $p_{O_2} = 0.5 \text{ MPa}$ )

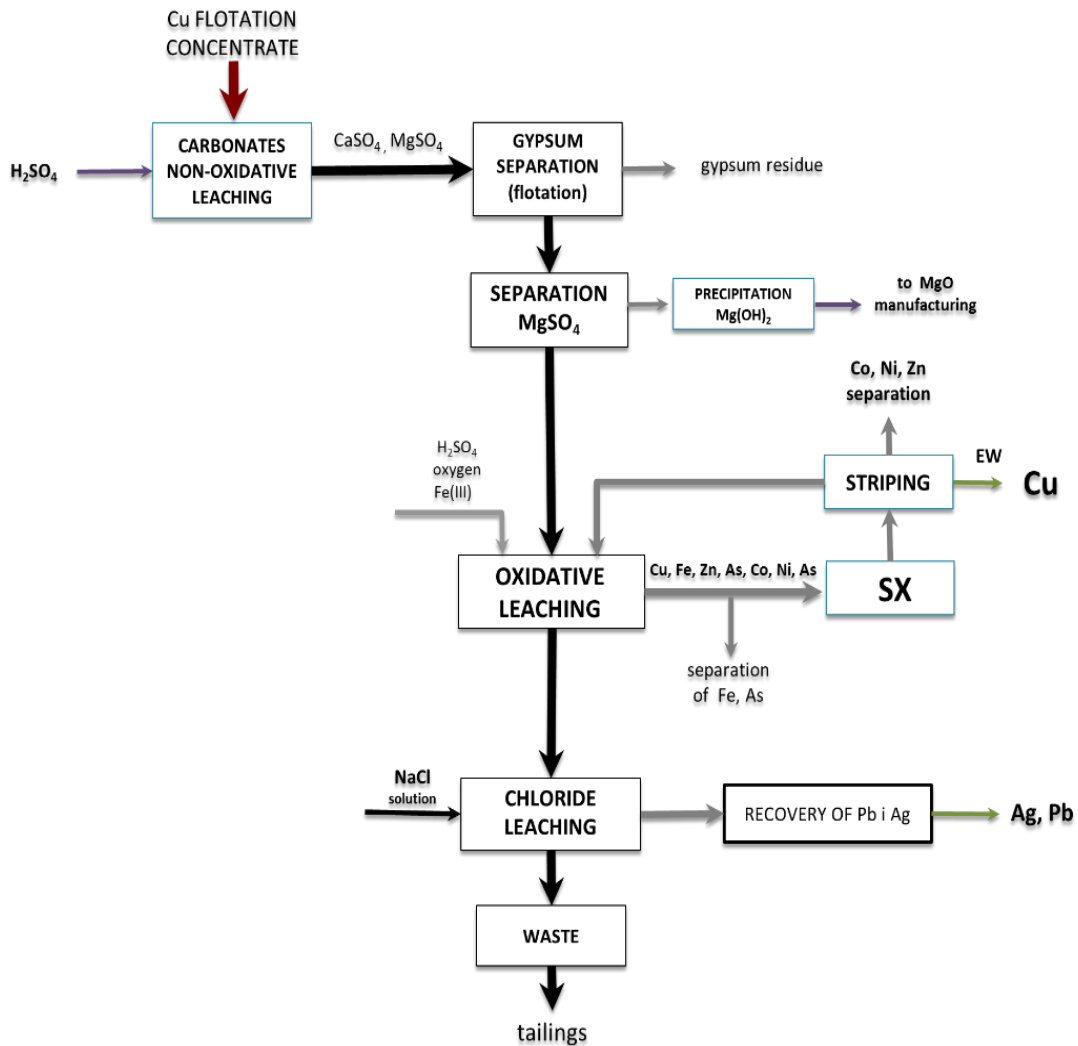
Temperatura oraz ciśnienie parcjale tlenu okazały się najważniejszymi parametrami ługowania ciśnieniowego (rys. 14 – 16). Stwierdzono, że w temperaturze 140°C i pod ciśnieniem tlenu wynoszącym 2 MPa proces jest bardzo skuteczny i pozwala na bardzo wysoki, oprócz niklu, stopień odzysku metali (rys. 17). Wysoką szybkość ługowania obserwowano nawet bez obecności żelaza(III) na początku procesu. Wykazano, że w pierwszej fazie ługowania zachodzi hamowanie procesu ługowania ciśnieniowego wynikające z kowelinizacji siarczków miedzi. Wykazano także, że w warunkach ługowania ciśnieniowego możliwe jest obniżenie stężenia arsenu w roztworze w wyniku jego hydrotermalnego wytrącania w postaci skorodytu ( $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) [R 1].

W oparciu o dane doświadczalne opracowano założenia projektowe technologii, w tym wielkości strumieni zawiesin i roztworów, liczbę i objętości reaktorów do ługowania nieutleniającego, atmosferycznego, ciśnieniowego i chlorkowego, parametry operacji jednostkowych, a także określono rodzaj ekstrahentów i parametry ekstrakcji dla roztworów powstających podczas ługowania. Opracowano schemat ideowy technologii uwzględniający odzyskiwanie większość metali zawartych w koncentracie (rys. 18) [H 21].



Rys. 17. Stopień wyługowania metali z koncentratu w procesie ciśnieniowym (temperatura 140°C, stężenie  $H_2SO_4$  60 g/l, ciśnienie tlenu 2,0 MPa, stosunek faz s:l 1:6, obroty mieszadła 400  $min^{-1}$ , czas ługowania 3 godziny)

W koncepcji technologii uwzględniono operacje ługowania nieutleniającego, atmosferycznego, ciśnieniowego i chlorkowego, separację metali na drodze ekstrakcji rozpuszczalnikowej (SX) oraz wydzielanie miedzi w procesie elektrolizy. Koncepcja uwzględnia odzyskiwanie srebra i ołowiu na drodze ługowania chlorkowego. Ołów, wytrączony z roztworu w postaci węglanu, byłby odzyskiwany w istniejącej technologii w piecu wahadłowo - obrotowym, natomiast srebro wydzielano by z roztworu na drodze cementacji na ołowiu i kierowano do rafinacji. Badano też możliwość selektywnego wydzielania srebra na drodze elektrolizy potencjostatycznej [H 23].



Rys. 18. Schemat ideowy procesu hydrometalurgicznego dla odzysku miedzi i metali towarzyszących z flotacyjnego koncentratu ZWR Lubin [H 21]

Wyniki badań nad opracowaniem hydrometalurgicznej metody przetwarzania specjalnych koncentratów flotacyjnych, w tym koncentratu końcowego oraz wysokouzyskowego, były prezentowane w postaci referatów na konferencjach o zasięgu międzynarodowym oraz opublikowano w artykułach [H 15-H 26].

- H 15. **Chmielewski Tomasz:** *Hydrometallurgy in KGHM Polska Miedz SA – circumstances, needs and perspectives of application*, Separation Science and Technology. 2012, vol. 47, nr 9, s. 1264-1277, Toż w: Fray International Symposium on Metals and Materials Processing in a Clean Environment (dokument elektroniczny): proceedings, (Cancun, Mexico), November 27th- December 1st, 2011. Vol. 6, Aqueous, Low Temperature and Electrochemical Processing (ed. by Florian Kongoli). Mont-Royal : Flogen, cop. 2012. s. 349-371, Lokalizacja elektroniczna: <http://dx.doi.org/10.1080/01496395.2012.672531>  
Lokalizacja elektroniczna: <http://tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01496395.2012.672531>

**Punktacja MNiSW z 2010: 27; 2012: 25,**

Lista Filadelfijska – T

**IF - 1.164**

Rodzaj pracy: artykuł; zasięg: międzynarodowy

Mój wkład w powstanie pracy polegał na analizie literaturowej zastosowania znanych procesów hydrometalurgicznych do przetwarzania rud, półproduktów i koncentratów miedzi na świecie. Wykonałem analizę specyfiki geologicznej, litologicznej, mineralogicznej i chemicznej surowców miedzi przetwarzanych w KGHM. Dokonałem oceny skuteczności dotychczasowych technologii przeróbki rud miedzi w Polsce. Przeanalizowałem kryteria wyboru metod ługowania dla siarczkowych surowców miedzi. Mój udział w pracy: **100%**.

H 16. **Chmielewski Tomasz**, Borowski Kamil, Gibas Krzysztof, Ochromowicz Katarzyna, Woźniak Barbara Z: *Atmospheric leaching of copper flotation concentrate with oxygenated sulphuric acid solutions*, Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2011, nr 47, s. 193-206, Lokalizacja elektroniczna: <http://www.minproc.pwr.wroc.pl/journal/pdf/ppmp47.193-206.pdf>

**Punktacja MNiSW z 2010: 13; 2012: 20,**

Lista Filadelfijska - T

**IF - 0.500**

Rodzaj pracy: artykuł; zasięg: międzynarodowy

Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu programu badań, pobraniu próbek koncentratu miedzi z obiegu flotacji ZWR Lubin, uczestnictwie w wykonaniu doświadczeń i określeniu wpływu wybranych parametrów na atmosferyczne ługowanie miedzi i metali towarzyszących. Opracowałem tekst publikacji. Mój udział procentowy w pracy szacuję na **40%**.

H 17. **Chmielewski Tomasz**, Kaleta Rafał: *Galvanic interactions of sulfide minerals in leaching of flotation concentrate from Lubin concentrator*, Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2011, nr 46, s. 21-34,

Lokalizacja elektroniczna: [http://www.minproc.pwr.wroc.pl/journal/pdf/2011\\_46/FPM%2046/Chmielewski%20and%20Kaleta.pdf](http://www.minproc.pwr.wroc.pl/journal/pdf/2011_46/FPM%2046/Chmielewski%20and%20Kaleta.pdf)

Lokalizacja elektroniczna: <http://www.dbc.wroc.pl/publication/11253>

**Punktacja MNiSW z 2010: 13; 2012: 20, udział:**

Lista Filadelfijska - T

**IF - 0.500**

Rodzaj pracy: artykuł; zasięg: międzynarodowy

Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu programu badań elektrochemicznych na elektrodach wykonanych z naturalnych siarczków miedzi ze złóż LGOM, wykonaniu elektrod siarczkowych do pomiarów elektrochemicznych, interpretacji wyników pomiarów. Wniosłem istotny wkład w opracowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy w pracy szacuję na **70%**.

- H 18. Muszer Antoni, Wódka Jerzy, **Chmielewski Tomasz**, Matuska Sabina A: *Covellinisation of copper sulphide minerals under pressure leaching conditions*, Hydrometallurgy. 2013, vol. 137, s. 1-7, Lokalizacja elektroniczna: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.03.010>  
**Punktacja MNiSW z 2012: 45; 2013: 45, udział:** Lista Filadelfijska - T  
**IF - 2.224**  
Rodzaj pracy: artykuł; zasięg: międzynarodowy  
Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu programu badań, pobraniu próbek koncentratu miedzi z obiegu flotacji ZWR Lubin, przygotowaniu, charakterystyce chemicznej i mineralogicznej próbek do ługowania ciśnieniowego, analizie wyników eksperymentów. Wniosłem znaczny wkład w opracowanie tekstu publikacji. Mój udział procentowy w pracy szacuję na **30%**.
- H 19. Ochromowicz Katarzyna, **Chmielewski Tomasz**: *Solvent extraction of copper(II) from concentrated leach liquors*, Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2013, vol. 49, nr 1, s. 357-367, Lokalizacja elektroniczna: <http://www.minproc.pwr.wroc.pl/journal/pdf/ppmp49-1.357-367.pdf>  
**Punktacja MNiSW z 2012: 20; 2013: 20,**  
Lista Filadelfijska - T  
**IF - 0.862**  
Rodzaj pracy: artykuł; zasięg: międzynarodowy  
Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu programu badań ekstrakcji miedzi z roztworów obiegowych ługowania koncentratu miedzi, przygotowaniu prób roztworów po ługowaniu atmosferycznym flotacyjnego koncentratu miedzi do ekstrakcji. Współuczestniczyłem w opracowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy w pracy szacuję na **50%**.
- H 20. Gibas Krzysztof, Borowski Kamil, **Chmielewski Tomasz**, Wejman Katarzyna: *Recovery of cobalt and nickel by atmospheric leaching of flotation sulfide concentrate from Lubin Concentrator*, Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2015, vol. 51, nr 1, s. 191-203, Lokalizacja elektroniczna: <http://www.minproc.pwr.wroc.pl/journal/pdf/ppmp51-1.335-350.pdf>  
**Punktacja MNiSW z 2014: 25,**  
Lista Filadelfijska - T  
**IF - 0.862 (2013)**  
Rodzaj pracy: artykuł; zasięg: międzynarodowy  
Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu programu badań, pobraniu próbek koncentratu z obiegu flotacji ZWR Lubin, jego charakterystyce chemicznej i mineralogicznej, analizie wyników eksperymentów z punktu widzenia skuteczności odzyskiwania niklu i kobaltu. Uczestniczyłem w opracowanie tekstu publikacji. Mój udział procentowy w pracy szacuję na **25%**.
- H 21. **Chmielewski Tomasz**: *Development of a hydrometallurgical technology for production of metals from KGHM Polska Miedz S.A. concentrates*, Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2015, vol. 51, nr 1, s. 335-350, Lokalizacja elektroniczna: <http://www.minproc.pwr.wroc.pl/journal/pdf/ppmp51-1.335-350.pdf>  
**Punktacja MNiSW z 2014: 25,**

Lista Filadelfijska - T

**IF - 0.862** (2013)

Rodzaj pracy: artykuł; zasięg: międzynarodowy

Mój wkład w powstanie pracy polegał na analizie uwarunkowań przetwarzania rud, półproduktów i koncentratów miedzi w KGHM, w tym niekorzystnych zmian składu nadaw do flotacji. Analizowane były: specyfika właściwości geologicznych, litologicznych, mineralogicznych i chemicznych surowców miedzi przetwarzanych w KGHM. W oparciu o wyniki badań w Projekcie HYDRO zaproponowana została koncepcja hydrometalurgicznej technologii przetwarzania siarczkowych koncentratów wytwarzanych w ZWR Lubin. Opracowałem tekst publikacji. Mój udział w pracy: **100%**.

H 22. **Chmielewski Tomasz**, Konieczny Andrzej, Drzymała Jan, Kaleta Rafał, Łuszczkiewicz Andrzej: *Development concepts for processing of Lubin-Glogow complex sedimentary copper ore*, W: XXVII International Mineral Processing Congress, IMPC 2014 (dokument elektroniczny): Santiago, Chile, October 20-24, 2014 (eds. Juan Yianatos i in.) B.m.: b.w., 2014, s. 10-19, Pendrive

Rodzaj pracy: referat; zasięg: międzynarodowy,

Mój wkład w powstanie pracy polegał na analizie dotychczas stosowanych metod podniesienia stopnia uzysku miedzi i metali towarzyszących z rud, półproduktów i koncentratów miedzi w KGHM z zastosowaniem operacji hydrometalurgicznych. Współuczestniczyłem w opracowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy w pracy szacuję na **50%**.

H 23. Kowalska Sylwia, Lukomska Aneta, Los Przemysław, **Chmielewski Tomasz**, Woźniak Barbara Z: *Potential-controlled electrolysis as an effective method of selective silver electrowinning from complex matrix leaching solutions of copper concentrate*, International Journal of Electrochemical Science (dokument elektroniczny), 2015, vol. 10, nr 1, s. 1186-1198, Lokalizacja elektroniczna: <http://www.electrochemsci.org/papers/vol10/100201186.pdf>

**Punktacja MNiSW z 2014: 25,**

Lista Filadelfijska - T

**IF - 1.956** (2013)

Rodzaj pracy: artykuł; zasięg: międzynarodowy

Mój wkład w powstanie pracy polegał na przygotowaniu i charakterystyce chemicznej i mineralogicznej nadaw do ługowania chlorkowego srebra i ołowiu (koncentrat miedzi z KGHM poddany ługowaniu nieutleniającemu i atmosferycznemu), uczestniczyłem w interpretacji wyników badań elektrochemicznych i powstaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy w pracy szacuję na **20%**.

## PATENTY

Efektom wieloletnich badań prowadzonych dla podniesienia stopnia odzysku miedzi i metali towarzyszących uzyskane i zgłoszone zostały następujące patenty:

- H 24. **Chmielewski Tomasz**, Łuszczkiewicz Andrzej, Kozłowska-Kołodziej Barbara, Adamski Zbigniew, Cieszkowski Henryk, Moruzgała Kazimierz, Milewski Zygmunt, Wdowiak Ryszard, Cypko Marek, Garbaczewski Jan: Patent. Polska, nr 177937. Sposób podwyższania jakości siarczkowego koncentratu miedziowego. IntCl6: C22B 1/14, C22B 3/06. Zgłosz. nr 307829 z 22.03.1995. Opubl. 31.01.2000 , 4 s.  
Lokalizacja elektroniczna: [http://pubserv.uprp.pl/PublicationServer/generuj\\_dokument.php?plik=PL\\_000000000177937\\_B1\\_PDF](http://pubserv.uprp.pl/PublicationServer/generuj_dokument.php?plik=PL_000000000177937_B1_PDF)  
Rodzaj pracy: patent; zasięg: lokalny  
Mój wkład w powstanie patentu polegał na analizie wyników wielu serii eksperymentów chemicznej modyfikacji nadaw do flotacji (odpad I czyszczenia ZWR Lubin) przy różnych stopniach rozkładu węglanów, wspólnej analizie wyników i ich korelacji z uzyskanymi wskaźnikami flotacji. Wniosłem też udział w opracowanie tekstu zgłoszenia patentowego. Mój udział procentowy w pracy szacuję na **20%**.
- H 25. **Chmielewski Tomasz**, Łuszczkiewicz Andrzej, Patent. Polska, nr 196946. Sposób przerobu materiałów zawierających siarczkowe minerały metali oraz minerały węglanowe oraz inne minerały płonne przy użyciu kwasu siarkowego lub jego roztworów, Zgłosz. nr 355344 z 05.08.2002. Opubl. 27.01.2003 , 4 s.  
Rodzaj pracy: patent; zasięg: lokalny  
Mój wkład w powstanie patentu polegał na analizie wyników wielu serii eksperymentów chemicznej modyfikacji nadaw do flotacji (odpad I czyszczenia ZWR Lubin i ZWR Polkowice) przy różnych stopniach rozkładu węglanów, wspólnej analizie wyników i ich korelacji z uzyskanymi wskaźnikami flotacji w skali laboratoryjnej i przemysłowej. Wniosłem też udział w opracowanie tekstu zgłoszenia patentowego. Mój udział procentowy w pracy szacuję na **50%**.
- H 26. **Chmielewski Tomasz**, Drzymała Jan, Łuszczkiewicz Andrzej, Trochimczuk Andrzej, Adamski Zbigniew, Wódka Jerzy, Ochromowicz Katarzyna, Kowalczyk Przemysław, Borowski Kamil, Gibas Krzysztof, Woźniak Barbara, Muszer Antoni, Zgłoszenie patentowe nr. P405901 z dnia 5. Listopada 2013 r., Sposób hydrometalurgicznego przerobu surowców polimetalicznych.  
Mój wkład w powstanie patentu polegał na samodzielnym stworzeniu i opracowaniu koncepcji technologii hydrometalurgicznego przetwarzania siarczkowych surowców polimetalicznych, w tym koncentratów i półproduktów flotacji z obiegów wzbogacania KGHM. Określiłem rolę i parametry poszczególnych operacji jednostkowych stanowiących nowy proces technologiczny. Kierowałem samodzielnie (w latach od 2010 do 2013) projektem badawczym HYDRO, finansowanym ze środków NCBiR w ramach Przedsięwzięcia IniTech, którego wyniki badań stanowiły podstawę zgłoszenia patentowego. Wniosłem też kluczowy udział w opracowanie tekstu zgłoszenia patentowego. Mój udział procentowy w powstanie zgłoszenia patentowego szacuję na **60%**.

## RAPORTY

- R 1. Raport Półroczny z realizacji projektu w ramach Przedsięwzięcia „IniTech”, od 1. lutego 2013 do 31. lipca 2013.



Jako kierownik projektu HYDRO, finansowanego ze środków NCBiR w ramach Przedsięwzięcia IniTech byłem zobowiązany do przedstawiania półrocznych raportów zawierających wyniki badań wszystkich zadań objętych programem badań projektu.

Koniec Autoreferatu



*Wrocław, 15. maja 2015*