

# Flotacja termalna łupka miedzionośnego w obecności soli

Adrian Kosiński, Tomasz Ratajczak

Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii,  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: tomasz.ratajczak@pwr.edu.pl

---

## Streszczenie

W pracy zbadano wpływ temperatury na kinetykę solnej flotacji łupka miedzionośnego. Badania przeprowadzono w roztworach KCl i Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, o stężeniach 0,5 M i 1,0 M i temperaturach 10°C, 25°C, 40°C. Dodatkowo, badano wysokość piany flotacyjnej w funkcji rodzaju i stężenia soli oraz temperatury. W wyniku badań stwierdzono, że najwyższe wychody flotacji łupka uzyskano w temperaturze 10°C w obecności 1 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, a najniższe w temperaturze 25°C dla 0,5 M KCl. Jednocześnie wykazano, że zwiększenie stężenia soli skutkowało wyższymi wychodami flotacji łupka oraz nieznacznie większą pianą flotacyjną.

---

## Wprowadzenie

Miedź od setek lat stosowana jest w budownictwie, a od początku ery elektryczności jest głównym surowcem do produkcji przewodów elektrycznych. Poza tym jest składnikiem stopów metali, m.in. niklu, brązu, mosiądzu. Tak duże zapotrzebowanie wiąże się z masową eksploatacją. Występuje ona głównie w rudach siarczkowych (90%), a jej zawartość w rudzie uznaje się za ekonomicznie opłacalną do eksploatacji, gdy wynosi 0,5% (Copperalliance, 2019). W związku z tak małą jej zawartością urobek najpierw musi zostać poddany przeróbce. Podczas procesu flotacji uzyskuje się koncentrat, który jest niezbędny do dalszej przeróbki w hutach. Niestety złoża rud miedzi są nierównomiernie rozmieszczone na Ziemi. Znajdują się między innymi w Rosji, Ameryce, Chile, Polsce, Australii, Chinach. Przy tak zróżnicowanym położeniu, warunki klimatyczne mogą negatywnie lub pozytywnie wpływać na proces flotacji. W celu ograniczenia strat, a w optymistycznym wariacie maksymalizacji zysków, wynikających z różnych warunków termalnych, ważne dla przedsiębiorstw jest wcześniejsze poznanie wpływu temperatury na uzyskanie koncentratu w zakładach przerobczych. Podczas samego procesu flotacji używa się wody technologicznej, która naturalnie zawiera rozpuszczone sole. Poznanie zależności kinetyki flotacji solnej od temperatury, może pozwolić odpowiednio przygotować zakład wzbogacania rud do panujących warunków, na obszarze prowadzonej przeróbki kopalni.

Do tej pory zostały przeprowadzone badania wpływu temperatury na wychody flotacji łupka miedzionośnego w spieniaczach:  $\alpha$ -terpineolu, metyloizobutylokarbinolu (MIBC) oraz soli kuchennej (Redlicki, Drzymała, 2016; Chyła, Bakalarz, 2016). Redlicki i Drzymała (2016) przeprowadzili flotacje łupka miedzionośnego w temperaturach: 20°C, 40°C, 60°C. Wynika z nich, że wzrost temperatury w niewielkim lub żadnym stopniu wpływa na końcowy wychód. Jednak z krzywych kinetyki można odczytać różnicę w tempie jej przebiegu, tzn. otrzymano większy wychód dla tych samych czasów proporcjonalnie do wzrostu temperatury (Redlicki, Drzymała, 2016).

Różnica efektywności flotacji ze względu na różnicę temperatur może powodować kilka właściwości. Sama efektywność flotacji zależna jest w znacznym stopniu od napięcia powierzchniowego roztworu wodnego (Drzymała, 2009). Jego spadek powoduje obniżenie hy-

drofobowości ziarna (Drzymała, 2009). Charakterystyka zmienności napięcia powierzchniowego wody od temperatury przedstawiono na rysunku 2. Wynika z niego, że wraz ze wzrostem temperatury wody zmniejsza się jej napięcie powierzchniowe. Czyli teoretycznie flotacja powinna być bardziej wydajna w niższych temperaturach. Wyniki zgodne z tą zależnością uzyskała Chyła i Bakalarz (2016). Przeprowadzały one badania w spieniaczach  $C_2E_2$ ,  $C_4E_2$ ,  $C_6E_2$ . Według wyników tej pracy, flotacja łupka miedzionośnego w najniższej z badanych temperatur ( $15^\circ C$ ,  $25^\circ C$ ,  $35^\circ C$ ), zachodziła najszybciej i uzyskiwano najwyższe wychody (Chyła, Bakalarz, 2016).

## Metodyka badań

Do każdej flotacji użyto po 30 gram łupka miedzionośnego B (Drzymała i inni, 2017), o uziarnieniu poniżej 0,1 mm. Flotacje przeprowadzono w celce o pojemności  $0,3 \text{ dm}^3$ . Po odważeniu nadawy w komorze flotacyjnej, zalewano ją roztworem soli i całość wstępnie wymieszano bagietką szklaną. Następnie, celkę podłączono do maszyny flotacyjnej i przez 60 sekund mieszano mechanicznie zawiesinę, przy zamkniętym dopływie powietrza. Po tym czasie, odkręcano zawór powietrza i rozpoczynano flotację. W czasie flotacji, ubytek roztworu uzupełniano tym samym wodnym roztworem soli, a nadmierną pianę gaszono niewielką ilością wody destylowanej, przy użyciu zraszacza. Wychody flotacji łupka zbierano przez 0,5 min, 1,0 min, 3,0 min, 10 min, 10,5 min otrzymując 5 koncentratów i odpad. W przypadku flotacji  $Na_2SO_4$  w temperaturze  $10^\circ C$  pominięto 5 produkt, ponieważ otrzymywano już czystą, białą pianę i nie dochodziło już do flotacji ziaren. Po 25 minutowej flotacji flotownik był czyszczony, a uzyskane produkty przemywano wodą destylowaną w lejku Büchnera, w celu oczyszczenia produktów flotacji z soli. Następnie, produkty flotacji suszono w suszarce laboratoryjnej, w temperaturze  $105^\circ C$ , przez 24 h. Wysuszone próbki były ważone, w celu określenia wychodów produktów flotacji.

Flotacje łupka prowadzono w wodnych roztworach soli 0.5M, 1 M  $Na_2SO_4$  oraz KCl, o temperaturze  $10^\circ C$ ,  $25^\circ C$ ,  $40^\circ C$ .

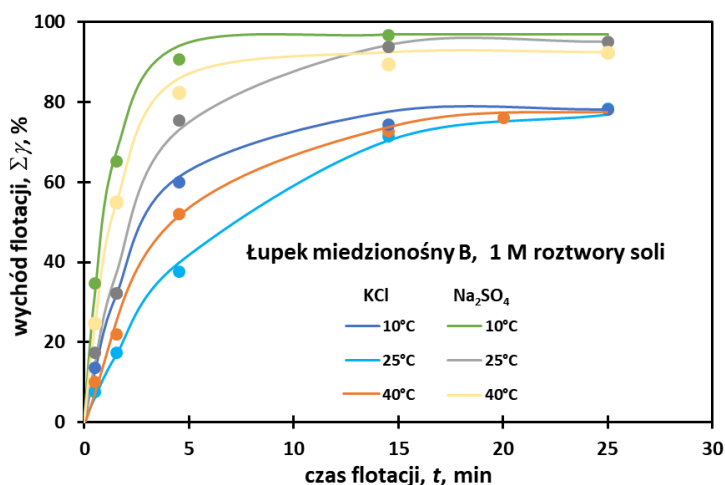
Dokładniejszy opis prac przygotowawczych dla badanych próbek łupka miedzionośnego oraz metodyki badawczej, w tym kontroli temperatury w czasie prowadzonej flotacji, można znaleźć w pracy dyplomowej Kosińskiego (2020).

## Wyniki i dyskusja badań

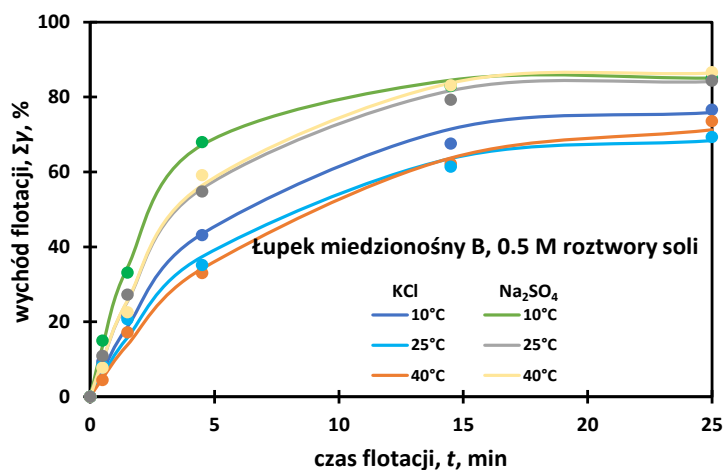
Na rysunku 1 przedstawiono krzywe kinetyki flotacji łupka miedzionośnego B w obecności wodnych roztworów KCl oraz  $Na_2SO_4$  o stężeniu 1 M i przy różnych temperaturach. Z otrzymanych danych wynika, że wyższe wychody flotacji łupka B, w badanych temperaturach, uzyskano dla 1 M  $Na_2SO_4$ . Jednocześnie, w obu przypadkach uzyskano korzystne działanie temperatury  $10^\circ C$  na flotację badanego łupka. Dodatkowo widać, że w początkowym czasie flotacji (4,5 min) różnice w wychodach flotacji, pomiędzy badanymi temperaturami flotacji, są większe niż w czasie 14,5 min flotacji. Najniższe wartości wychodów flotacji łupka odnotowano w temperaturze  $25^\circ C$ .

Na rysunku 2. przedstawiono porównanie krzywych kinetyki flotacji termalnej łupka B w 0,5 M roztworach soli. Flotacja łupka miedzionośnego w roztworach  $Na_2SO_4$  i KCl o stężeniu 0,5 M jest słabsza, w porównaniu do roztworów 1 M soli (rys. 1), co udowodnili już

w swojej pracy Kuklińska i Ratajczak (2016). Najwyższe wychody flotacji łupka B uzyskano dla temperatury 10°C, a najniższe przy 25°C.



Rys. 1. Krzywe kinetyki flotacji (pierwszego rzędu) łupka miedzionośnego B w 1 M roztworach solnych i różnych temperaturach

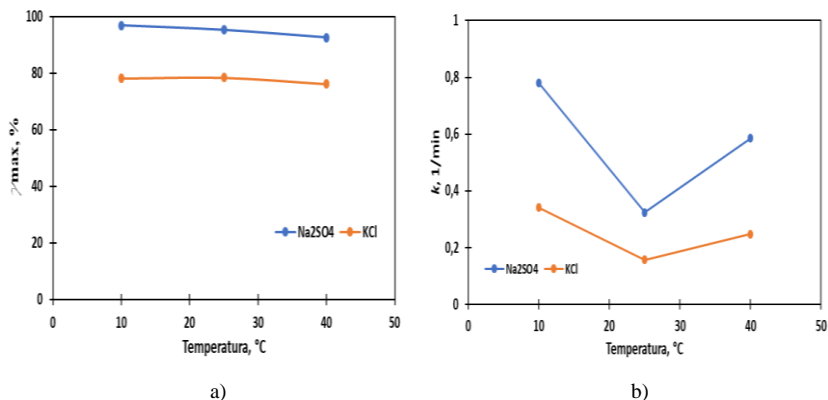


Rys. 2. Krzywe kinetyki flotacji (pierwszego rzędu) łupka miedzionośnego B w 0,5 M roztworach solnych i różnych temperaturach

Dodatkowo, można zauważyć, że wychód flotacji łupka w obecności w 0,5 M KCl w 25°C jest niższy, niż w przypadku 1 M KCl (rys. 1). Ponadto, dla flotacji łupka w temperaturze 40°C w 0,5 M KCl wykazano zmniejszenie wychodu łupka w przeciwieństwie do 1,0 M KCl, gdzie zaobserwowano nieznaczny wzrost (rys. 1). W przypadku Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> zauważono wzrost wychodu po 14,5 min w temperaturze 40°C. Taki wynik jest odwrotny w porównaniu do flotacji w obecności 1 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (rys. 1). Wykazano również mniejsze wychody łupka B w obecności 0,5 M

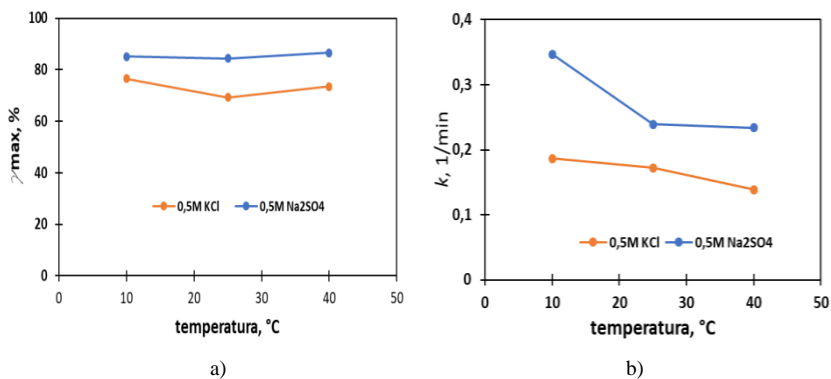
$\text{Na}_2\text{SO}_4$  w każdej temperaturze roztworu, po czasie 4,5 min i 14,5 min, niż w obecności 1 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (rys. 1).

Pomimo dużego wpływu temperatury na kinetykę flotacji nie zanotowano większych różnic w maksymalnym wychodzie (rys. 3). Wpływ temperatury na wychód maksymalny podczas flotacji w KCl jest znikomy. Sama tendencja jest odwrotnie proporcjonalna do temperatury. Wychód flotacji łupka B malał wraz ze wzrostem temperatury flotacji.



Rys. 3. Zależność a) wychodu maksymalnego b) stałej prędkości flotacji łupka miedzionośnego od temperatury, w roztworach soli o stężeniu 1 M

Na podstawie rysunków (3a, 3b) stwierdzono, że obniżenie temperatury poniżej pokojowej najbardziej przyspiesza i tym samym polepsza flotację łupka B. Zarówno w roztworach jedno i półmolewowych KCl,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  wartość stałej szybkości flotacji  $k$  była najwyższa w temperaturze 10°C (rys. 4).

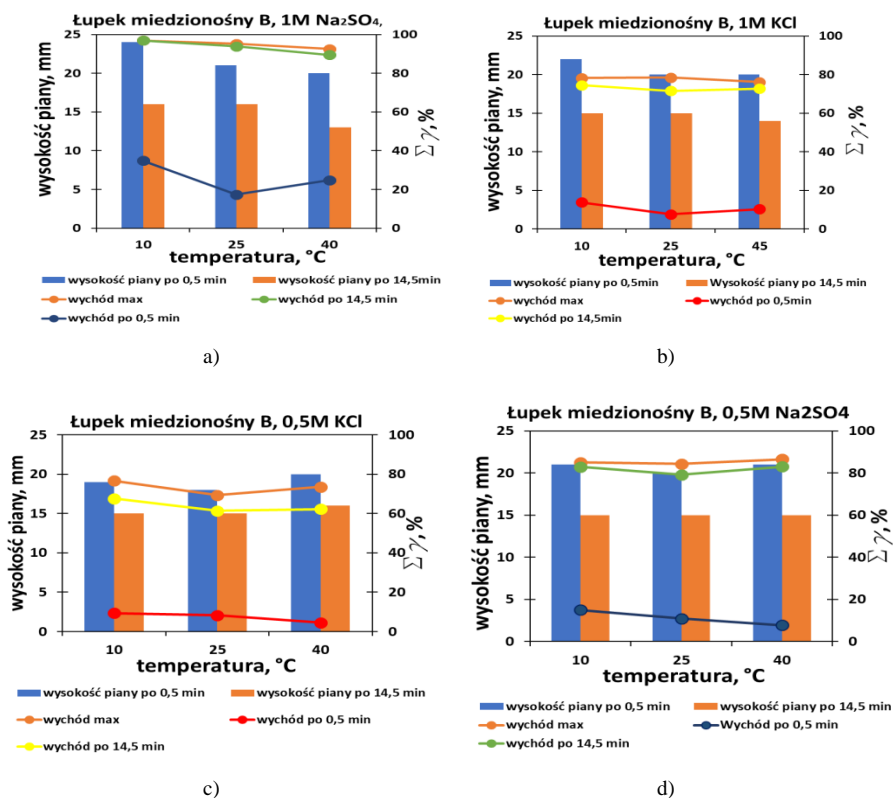


Rys. 4. Zależność a) wychodu maksymalnego b) stałej prędkości flotacji łupka miedzionośnego od temperatury, w roztworach soli o stężeniu 0,5 M

Porównując wychody maksymalne od stężenia wodnych roztworów soli i temperatury, zauważalny jest wzrost wychodów flotacji łupka w zależności od rodzaju i stężenia soli. Najwyż-

sze wyniki wychodów uzyskano dla 1 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Natomiast nieznaczne zmiany w wychodach flotacji solnej łupka wykazano, przy zmianie temperatury.

Podczas przeprowadzania flotacji badana była wysokość piany. Zestawienie wysokości piany po 0,5 min i 14,5 min z wychodami łupka, otrzymanymi w tym czasie, pokazano na rysunku 5. Dodatkowo umieszczono na nim maksymalny uzyskany wychód. Można zauważyć, że wysokość piany jest większa w roztworach soli jednomolowych niż półmolowych. Nie występuje jednak żaden związek, różnicy uzyskanych wychodów z wysokością piany. Sama temperatura również nieznacznie wpływa na jej wysokość. Można jednak stwierdzić, że przy flotacji łupka miedzionośnego B w  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  uzyskiwano wyższą pianę, niż w roztworze KCl.



Rys. 5. Zależność wysokości piany flotacyjnej oraz wychodów od temperatury flotacji łupka B w roztworach solnych: a) 1 M KCl, b) 1 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , c) 0,5 M KCl, d) 0,5 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

## Podsumowanie

W pracy zbadano wpływ temperatury na kinetykę flotacji łupka miedzionośnego B w roztworach solnych KCl i  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , o stężeniach 0,5 M i 1 M.

Z przeprowadzonych badań wynika, że flotacja łupka była najszybsza w temperaturze 10°C. W przypadku  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  wzrost temperatury do 40°C ponownie zwiększał szybkość flotacji łupka, niezależnie od stężenia roztworu soli. Natomiast podczas flotacji łupka w 0,5 M KCl wzrost temperatury, powodował spadek szybkości flotacji. W 1 M KCl charakterystyka kine-

tyki flotacji była taka sama jak w roztworach  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Różnica otrzymywanych maksymalnych wychodów od temperatury wynosiła maksymalnie 7%, w przypadku flotacji łupka miedzionośnego w 0,5 M KCl. W wynikach flotacji łupka B w 1 M KCl, 1 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i 0,5 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  różnica wychodów wahała się w granicach 3–5%.

Ponadto stwierdzono, że im większa masa molowa soli, tym szybsza flotacja i większy wychód kumulowany łupka B. Zwiększenie stężenia soli przyczyniało się do lepszej kinetyki flotacji oraz większych maksymalnych wychodów badanego łupka miedzionośnego. Badając wpływ wysokości otrzymywanej piany na wychody flotacji łupka, stwierdzono, że nie miała ona znacznego wpływu na otrzymywane wychody.

## Literatura

- CHYŁA M., BAKALARZ A., 2016. *Wpływ temperatury na kinetykę flotacji łupka miedzionośnego*. W: *Łupek Miedzionośny II*, J. Drzymała, P.B. Kowalczyk (red.), WGGG PWr, Wrocław, 141–147.
- COPPERALLIANCE, 2019. <https://copperalliance.pl/baza-wiedzy/edukacja/wydobycie.otrzymywanie-miedzi-z-rud-rudy-siarczkowe/>, (dostęp: 26.10.2019).
- DRZYMAŁA J., 2009. *Podstawy mineralurgii* (red.), WGGG PWr, Wrocław, 251–313.
- DRZYMAŁA J., KARWOWSKI P., BOROWSKI P., PAŹLIK P.M., KOWALCZYK P.B., 2017. *Próba klasyfikacji łupków Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego na podstawie zawartości węglanów, mineralów ilastych, węgla organicznego oraz miedzi*. W: *Łupek miedzionośny III*, P.B. Kowalczyk, J. Drzymała (red.), WGGG PWr, Wrocław, 52–58.
- KOSIŃSKI A., 2020. *Kinetyka flotacji łupka miedzionośnego w wodach zasolonych zróżnicowanych termalnie*, praca dyplomowa, niepublikowana, WGGG PWr.
- REDLICKI M., DRZYMAŁA J., 2016. *Wpływ temperatury na flotację łupka miedzionośnego*. W: *Łupek Miedzionośny II*, J. Drzymała, P.B. Kowalczyk (red.), WGGG PWr, Wrocław, 132–135.