

Zdolność biotransformacji nieorganicznych związków siarki przez wybrane szczepy autotroficznych i miksotroficznych bakterii siarkowych i żelazowych

Beata Cwalina¹
Zofia Dzierżewicz¹
Teresa Farbiszewska²
Katarzyna Mikluszka¹

1. Wstęp

W procesach technologicznych mikrobiologicznego ługowania metali z minerałów siarczkowych wykorzystuje się głównie bakterie *Thiobacillus ferrooxidans*, wykazujące zdolność utleniania jonów żelazowych oraz siarki i jej związków nieorganicznych (1 – 3). Działanie tych mikroorganizmów może być wspomagane przez obecność innych bakterii — ze szczególnym uwzględnieniem gatunku *Thiobacillus thiooxidans*, czerpiącego energię z procesów utleniania siarki elementarnej oraz jej związków mineralnych (4,5). Prowadzone są liczne badania nad możliwością zastosowania w procesach ługowania także innych mikroorganizmów, na przykład termofilnych szczepów bakterii z rodzaju *Sulfolobus*, zdolnych do utleniania jonów żelazowych, siarki oraz minerałów siarczkowych przy temperaturach w zakresie 30 – 85°C (2,3,5).

Trudności w izolowaniu czystych kultur wielu gatunków bakterii zdolnych do utleniania siarki i jej związków nieorganicznych sprawiły, że wyjaśnienie ich metabolicznej aktywności znacznie się opóźnia, a kierunki przemian metabolicznych pozostają dyskusyjne (6 – 9).

Podobne problemy występują przy próbach oceny zdolności utleniania jonów żelazowych przez poszczególne gatunki bakterii — zarówno autotroficznych, jak i miksotroficznych oraz heterotroficznych. Jony żelazowe mogą być substratem energetycznym dla *T. ferrooxidans* oraz dla tzw. bakterii żelazowych. Te ostatnie stanowią dużą grupę, nie dość dokładnie poznaną i opracowaną pod względem ich klasyfikacji oraz właściwości fizjologicznych (10 – 12). Klasyfikacja tych drobnoustrojów opiera się głównie na cechach morfolo-

¹ Katedra Biochemii i Biofizyki, Śląska AM, Katowice.

² Instytut Chemii, WSP, Opole.

gicznych i rozmieszczeniu ekologicznym (12). Duża różnorodność form bakterii żelazowych oraz częste podobieństwo do innych grup mikroorganizmów stwarzają najpoważniejsze problemy w ich zaklasyfikowaniu (11).

W Katedrze Biochemii i Biofizyki Śląskiej Akademii Medycznej wyizolowano gramdodatnie, miksotroficzne bakterie, które wykazywały zdolność utleniania zarówno jonów żelazowych jak i siarki oraz jej związków nieorganicznych. Podobieństwo wielu cech fizjologicznych tych drobnoustrojów do gatunku *T. ferrooxidans* było inspiracją do podjęcia badań nad możliwością ich wykorzystania w procesach ługowania metali z minerałów siarczkowych oraz utleniania siarki i jej związków nieorganicznych. Przedmiotem pracy jest analiza wyników przeprowadzonych w tym kierunku doświadczeń.

2. Materiały i metody

Procesy biologicznego utleniania nieorganicznych związków siarki prowadzono w obecności autotroficznych bakterii siarkowych rodzaju *Thiobacillus* oraz miksotroficznych bakterii utleniających siarkę i jony żelazawe, zakwalifikowanych do rodzajów *Sulfobacillus* i *Siderocapsa*. W oparciu o wyniki wcześniejszych doświadczeń, w badaniach wykorzystano następujące szczepy: *T. ferrooxidans* F26 - 77, *T. thiooxidans* T29 - 77, *Siderocapsa* sp. 26 - 1(1) i *Sulfobacillus* sp. 26 - 9(1). Wszystkie szczepy wyizolowano z wód dołowych kopalń węgla kamiennego. Bakterie *T. ferrooxidans* namnażano w pożywce płynnej 9K Silvermana i Lundgrena (13), *T. thiooxidans* — w pożywce Waksmana i Joffe (14), natomiast bakterie miksotroficzne hodowano w pożywce Winogradzkiego (15,16).

Badania efektywności utleniania jonów żelazowych w obecności bakterii i bez ich udziału prowadzono w standardowym roztworze 9K, czyli pożywce Silvermana i Lundgrena (13), natomiast badania efektywności utleniania siarki elementarnej S^0 , jonów tiosiarczanowych $S_2O_3^{2-}$ oraz naturalnych minerałów siarczkowych: piryty FeS_2 i sfaleryty ZnS , prowadzono w pożywce Waksmana i Joffe (14) oraz w roztworach stanowiących jej modyfikacje, do których wprowadzano wymienione substraty siarkowe zamiast siarki elementarnej. Skład roztworów zastosowanych w przeprowadzonych badaniach podano w tab. 1. Ich odczyn doprowadzono do pH 2,8 przy użyciu 1N roztworu kwasu siarkowego (w układach zawierających pożywki standardowe) lub kwasu solnego (w układach zawierających modyfikacje pożywki Waksmana i Joffe). Roztwory sterylizowano w autoklawie przy ciśnieniu 150 kPa, w temperaturze $121^\circ C$, przez 30 min. Wyjątkiem były nietrwałe roztwory tiosiarczanu sodowego oraz siarczanu żelazowego, które przygotowywano przez rozpuszczenie odpowiedniej soli w 200 cm^3 wody destylowanej. Ich sterylizację prowadzono przy użyciu filtrów bakteriologicznych Seitz. Roztwór tiosiarczanu poddawano dodatkowo stabilizacji w czasie 14 dni. Uzyskane roztwory łączono z odpowiednią ilością (800 cm^3) roztworów zawierających pozostałe składniki podłoża. Siarkę sterylizowano w alkoholu jako kwiat siarkowy, natomiast stery-

lizację minerałów siarczkowych prowadzono w suszarce w temperaturze 100°C przez 1 godzinę. Procedurę tę powtarzano trzykrotnie w odstępach 24-godzinnych. Doświadczenia prowadzono w układach statycznych, w kolbach Erlenmeyera o pojemności 300 cm³, do których wlewano 200 cm³ odpowiedniego roztworu wraz z substratem energetycznym. Układy szczepiono aktywnymi kulturami badanych bakterii dla uzyskania ich początkowej koncentracji rzędu 10⁶ komórek w 1 cm³ płynu. Czas trwania doświadczeń wynosił 96 godzin. Wyjątek stanowiły układy z jonami tiosiarczanowymi, badane przez 24 godziny. Po określonym czasie roztwory odwirowano i wykonywano analizy chemiczne. Stężenie jonów żelazawych oznaczano metodą manganometryczną (17), stężenie jonów siarczanowych oznaczano metodą wagową, natomiast jonów tiosiarczanowych — metodą miareczkowania jodometrycznego (18). Całkowite stężenia cynku oraz żelaza, uwolnionych do płynów ługujących z minerałów siarczkowych, oznaczano metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej przy zastosowaniu spektrofotometru absorpcji atomowej (model 400) firmy Perkin-Elmer. Pomiar pH wykonywano przy użyciu pH-metru typ N-512 firmy Mera-Elwro oraz elektrody kombinowanej. Równoległe do każdego układu zawierającego bakterie prowadzono doświadczenia w układach kontrolnych, do których dodawano tymol jako substancję bakteriostatyczną. Każdy układ doświadczalny był realizowany równocześnie w trzech kolbach, z których pobierano po dwie próbki do analiz chemicznych. Przedstawione wyniki są wartościami średnimi z sześciu oznaczeń.

TABELA 1
SKŁAD PODŁOŻY PLYNNYCH STOSOWANYCH W BADANIACH

Składnik	Stężenie składnika w roztworze (g/dm ³)					
	9K	WJ	WJ ₁	WJ ₂	WJ ₃	WJ ₄
(NH ₄) ₂ SO ₄	3,0	0,2	-	-	-	-
NH ₄ Cl	-	-	0,1	0,1	0,1	0,1
KCl	0,1	-	0,1	0,1	0,1	0,1
K ₂ HPO ₄	0,5	-	-	-	-	-
KH ₂ PO ₄	-	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
MgSO ₄ · 7H ₂ O	0,5	0,5	-	-	-	-
MgCl ₂ · 6H ₂ O	-	-	0,4	0,4	0,4	0,4
Ca(NO ₃) ₂	0,01	-	-	-	-	-
CaCl ₂ · 6H ₂ O	-	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
FeSO ₄ · 7H ₂ O	44,2	ślady	-	-	-	-
FeCl ₂	-	-	ślady	ślady	ślady	-
Na ₂ S ₂ O ₃ · 2H ₂ O	-	-	-	6,1	-	-
S ^o (kryst.)	-	10,0	2,0	-	-	-
ZnS	-	-	-	-	6,1	-
FeS ₂	-	-	-	-	-	3,8
pH roztworów	2,8					

gdzie: 9K — podłoże Silvermana i Lundgrena (13), WJ — podłoże Waksmana i Joffe (14), WJ₁, WJ₂, WJ₃, WJ₄ — modyfikacje podłoża WJ.

3. Wyniki

Ocenę przydatności badanych szczepów mikсотroficznych bakterii utleniających siarkę i jony żelazawe w procesach biotransformacji nieorganicznych związków siarki oraz bioekstrakcji metali z minerałów siarczkowych przeprowadzono w oparciu o badania efektywności utleniania jonów żelazawych Fe^{2+} , siarki elementarnej S^0 i jonów tiosiarczanowych $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, a także szybkości uwalniania metali (żelaza i cynku) z minerałów siarczkowych. Uzyskane wyniki przedstawiono w tab. 2. Wyniki badania efektywności utleniania jonów Fe^{2+} wykazały, że w obecności bakterii *T. ferrooxidans* F26 – 77 po 96 godzinach nastąpiło prawie zupełne utlenienie tych jonów. Wydajność procesu wynosiła 98%. W obecności testowanych szczepów bakterii mikсотroficznych była ona 3-krotnie niższa. W układzie kontrolnym, bez bakterii, utlenieniu uległo jedynie 3% jonów Fe^{2+} zawartych w roztworze. Można więc stwierdzić, że badane bakterie mikсотroficzne umożliwiały 10-krotny wzrost szybkości utleniania jonów Fe^{2+} , natomiast szczep *T. ferrooxidans* intensyfikował ten proces 30-krotnie.

TABELA 2
EFEKTYWNOŚĆ UTLENIANIA SUBSTRATÓW ENERGETYCZNYCH PO 96 GODZ (W PRZYPADKU $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$
— PO 24 GODZ) PRZEZ WYBRANE SZCZEPY BAKTERII SIARKOWYCH I ŻELAZOWYCH

Bakterie	(%) utlenienia substratu				
	Fe^{2+}	S^0	$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	ZnS	FeS_2
<i>T. thiooxidans</i> T29 – 77	–*	13,7	49,7	62,8	54,8
<i>T. ferrooxidans</i> F26 – 77	97,9	17,7	64,9	87,0	67,4
<i>Siderocapsa</i> sp. 26 – 1(1)	30,7	10,5	48,1	59,2	40,0
<i>Sulfobacillus</i> sp. 26 – 9(1)	29,8	8,7	37,6	59,7	36,6
T29 – 77 + F26 – 77	–*	–*	–*	–*	65,1
T29 – 77 + 26 – 1(1)	–*	–*	–*	–*	39,4
T29 – 77 + 26 – 9(1)	–*	–*	–*	–*	36,0
kontrola (bez bakterii)	3,1	1,2	1,6	12,7	4,6

gdzie: –* — nie badano

Także utlenianie siarki elementarnej S^0 przebiegało z największą wydajnością w obecności bakterii rodzaju *Thiobacillus*, szczególnie szczepu *T. ferrooxidans*. Szczepy bakterii mikсотroficznych powodowały wprawdzie 8-krotny wzrost wydajności procesu (w porównaniu z procesem przebiegającym w sterylnym układzie kontrolnym), jednak efekt ten był dwukrotnie słabszy od uzyskanego w układzie z *T. ferrooxidans* F26 – 77. Wyniki badania wydajności utleniania jonów tiosiarczanowych $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ oraz bioekstrakcji metali (cynku i żelaza) z minerałów siarczkowych (sfalerytu ZnS i pirytu FeS_2) wykazały dużą aktywność testowanych szczepów bakterii mikсотroficznych w odniesieniu do mineralnych substratów siarkowych, jednak i w tych przypadkach bakterie rodzaju *Thiobacillus* okazały się bardziej aktywne, chociaż różnice

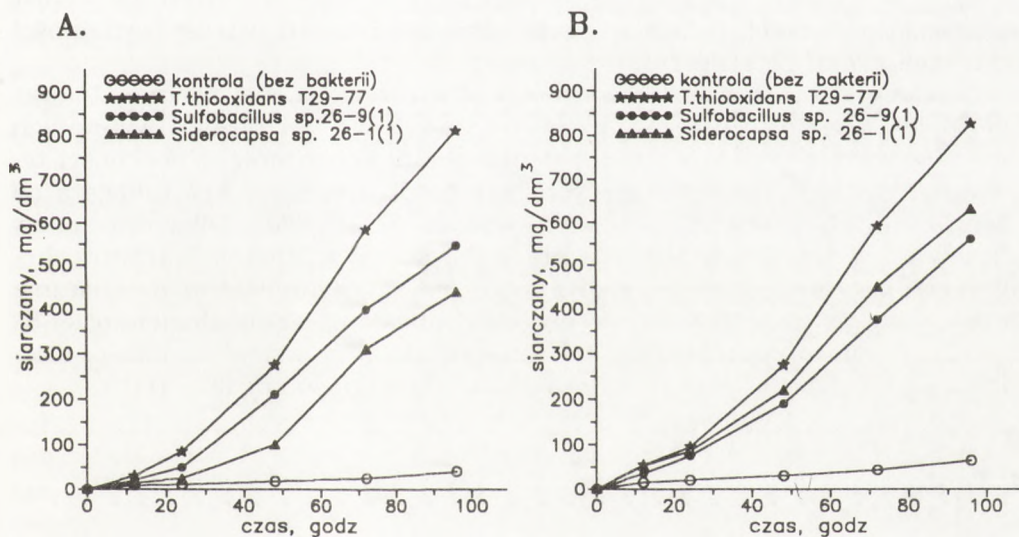
nie były już tak znaczne. Wydajności analizowanych procesów, uzyskiwane przy udziale aktywnego szczepu *T. ferrooxidans* F26 - 77, były jedynie 1,3-1,5 razy większe od stwierdzanych w obecności bakterii *Siderocapsa* sp. 26 - 1(1) i *Sulfobacillus* sp. 26 - 9(1). Zastosowanie mieszanin szczepów zdolnych do utleniania jonów Fe^{2+} (*T. ferrooxidans* lub testowanych bakterii miksotroficznych) ze szczepem *T. thiooxidans* (utleniającym siarkę i jej związki nieorganiczne) w procesie ługowania pirytu FeS_2 nie przyczyniło się do zwiększenia wydajności bioekstrakcji żelaza z tego minerału (tab. 2).

TABELA 3

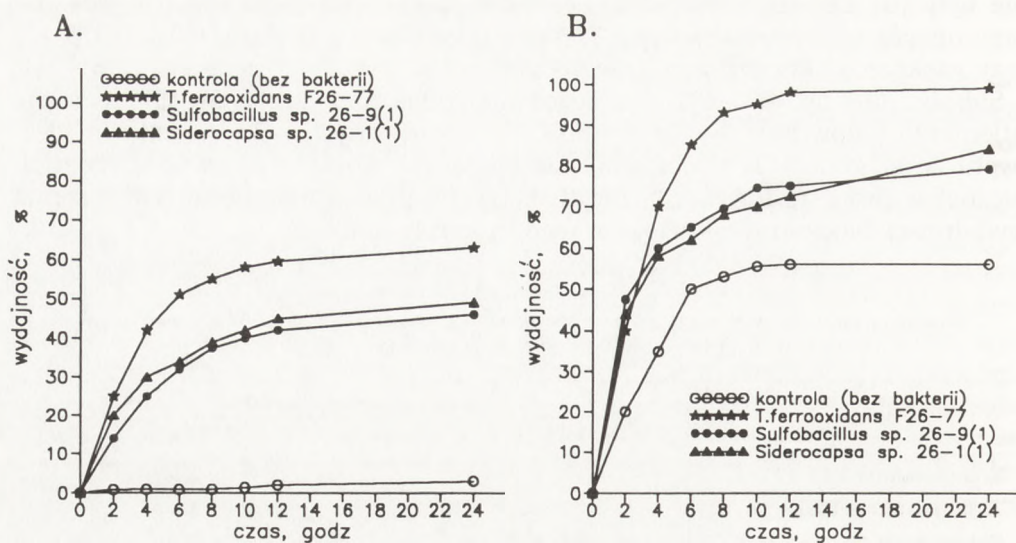
STĘŻENIA CYNKU I ŻELAZA W ROZTWORACH PO ŁUGOWANIU MINERALÓW SIARCZKOWYCH: PIRYTU FeS_2 I SFALERYTU ZnS PRZEZ WYBRANE SZCZEPY BAKTERII SIARKOWYCH I ŻELAZOWYCH

Bakterie	Stężenie metalu (g/dm ³)	
	Fe	Zn
<i>T. thiooxidans</i> T29 - 77	0,96	2,57
<i>T. ferrooxidans</i> F26 - 77	1,18	3,56
<i>Siderocapsa</i> sp. 26 - 1(1)	0,70	2,42
<i>Sulfobacillus</i> sp. 26 - 9(1)	0,64	2,44
kontrola (bez bakterii)	0,08	0,52

W tab. 3 zamieszczono stężenia żelaza i cynku w roztworach po ługowaniu naturalnych minerałów siarczkowych: pirytu FeS_2 i sfalerytu ZnS . W układach zawierających bakterie stężenie żelaza wahało się w granicach 0,6 -



Rys. 1. Dynamika utleniania siarki przez wybrane szczepy bakterii utleniających siarkę i żelazo: A — w nieobecności jonów Fe^{2+} ; B — w obecności jonów Fe^{2+} (2 g/dm³).



Rys. 2. Dynamika utleniania tiosiarczanu przez wybrane szczepy bakterii utleniających siarkę i żelazo: A — w nieobecności jonów Fe^{2+} ; B — w obecności jonów Fe^{2+} (2 g/dm^3).

– $1,2\text{ g/dm}^3$, a stężenie cynku w granicach $2,4 - 3,6\text{ g/dm}^3$ i było na poziomie stężeń tolerowanych przez badane szczepy (19). W sterylnych układach kontrolnych stężenia obu metali wynosiły odpowiednio $0,08\text{ g/dm}^3$ żelaza oraz $0,52\text{ g/dm}^3$ cynku. Można zatem stwierdzić, że w warunkach przeprowadzonych doświadczeń obecność bakterii powodowała 7 – 15-krotny wzrost wydajności ekstrakcji żelaza z pirytu oraz 5 – 7-krotny wzrost wydajności ekstrakcji cynku ze sfalerytu.

Wyniki badania dynamiki utleniania siarki elementarnej S^0 (rys. 1) oraz jonów tiosiarczanowych $S_2O_3^{2-}$ (rys. 2) z udziałem i bez udziału wybranych szczepów wykazały, że szybkości utleniania obu substratów w obecności testowanych bakterii miksotroficznych były bardzo zbliżone, lecz mniejsze od obserwowanych w obecności bakterii rodzaju *Thiobacillus*. Obecność jonów żelazawych w układzie istotnie stymulowała procesy utleniania (zarówno chemicznego jak i biologicznego) jonów $S_2O_3^{2-}$ (rys. 2), natomiast miała znacznie mniejszy wpływ na intensyfikację procesów utleniania siarki elementarnej S^0 (rys. 1). W tym przypadku jony żelazawe powodowały wzrost szybkości utleniania siarki głównie przy udziale bakterii *Siderocapsa* sp. 26 – 1(1).

4. Dyskusja

Wszystkie przemysłowe technologie bakteryjnego ługowania metali z materiałów siarczonośnych, jak dotąd, wykorzystują aktywne szczepy gatunku *T. ferrooxidans*. Czynnione są jednak próby praktycznego wykorzystania także

innych mikroorganizmów, na przykład termofilnych bakterii siarkowych z rodzajów *Sulfolobus*, *Sulfobacillus* oraz *Thermothrix*, działających w zakresie temperatur 45 – 90°C (2,3,5,15,20) i posiadających właściwości fizjologiczne podobne do bakterii rodzaju *Thiobacillus*. Prowadzone są również badania nad możliwością biologicznego ługowania niektórych materiałów przy udziale bakterii heterotroficznych z rodzajów *Arthrobacter*, *Pseudomonas* i in. (2,3), a także przy udziale grzybów, np. z rodzajów *Aspergillus* i *Penicillium* (3,15,21). Badania te nie wyszły jednak na ogół poza skalę laboratoryjną.

Poszukiwanie nowych gatunków mikroorganizmów przydatnych w procesach biohydrometalurgicznych jest jednym z głównych kierunków badań prowadzonych w tej dziedzinie (3,15). Wynika z tego zainteresowanie badaczy praktycznie każdym szczepem posiadającym właściwości sugerujące możliwość ich wykorzystania w biotechnice. Analizowane w pracy tej szczepy miksotroficznych bakterii, zdolnych do utleniania siarki, jej związków nieorganicznych oraz jonów żelazawych, zostały wyizolowane jako szczepy towarzyszące bakteriom *T. ferrooxidans*. Określono je jako *Siderocapsa* sp. 26 – 1(1) oraz *Sulfobacillus* sp. 26 – 9(1), gdyż nie odpowiadają one ściśle żadnemu z gatunków tych rodzajów, opisanych w literaturze. Wzrost badanych bakterii w mineralnej pożywce 9K Silvermana i Lundgrena (13) oraz w pożywce Waksmana i Joffe (14) sugerował możliwość ich wykorzystania w procesach ługowania metali. Inną korzystną cechą tych bakterii była ich szybkość namnażania się — większa w porównaniu ze stwierdzaną dla szczepów *T. ferrooxidans*. Stwarzało to szansę uzyskania większej ilości biomasy w krótszym czasie.

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że testowane bakterie posiadały zdolność wykorzystywania jonów żelazawych oraz siarki i jej związków mineralnych jako substratów energetycznych, ale szybkości katalizowanych przez nie procesów były mniejsze od stwierdzanych w obecności bakterii rodzaju *Thiobacillus* (tab. 2, rys. 1 i 2). Należy jednak zaznaczyć, że wybrane szczepy *T. ferrooxidans* F26 – 77 oraz *T. thiooxidans* T29 – 77 były najaktywniejszymi spośród szczepów wyizolowanych w Katedrze Biochemii i Biofizyki Śląskiej AM (22,23). Ponadto szczep *T. ferrooxidans* F26 – 77 charakteryzował się wyjątkowo dużą zdolnością adaptacyjną (23). Zróznicowanie aktywności metabolicznej bakterii *T. ferrooxidans* świadczy o istotnym wpływie czynników ekologicznych na zdolność ługującą tej grupy mikroorganizmów. Sugeruje to, że istnieje także możliwość wyosobnienia innych szczepów bakterii podobnych do testowanych drobnoustrojów, lecz o znacznie większej aktywności metabolicznej w stosunku do mineralnych związków siarki oraz jonów Fe^{2+} jako substratów energetycznych. Osiągnięcia biologii molekularnej i inżynierii genetycznej mogą ponadto doprowadzić do uzyskania szczepów łączących w sobie duże zdolności adaptacyjne oraz szybkości przekształcania substratów energetycznych, właściwe dla autotroficznych bakterii *T. ferrooxidans*, z możliwością szybkiego namnażania się, ewentualną termofilnością oraz innymi cennymi cechami wykazywanymi przez niektóre gatunki bakterii miksotroficznych.

Literatura

1. Lundgren D.G., Silver M., (1980), *Ann. Rev. Microbiol.*, 34, 263 – 283.
2. Brierley C.L., (1978), *CRC Crit. Rev. Microbiol.*, 6(3), 207 – 262.
3. *Proc. Int. Conf. Use of Microorganisms in Hydrometallurgy*, (1982), Hung. Acad. Sci. Local Comm., Pécs (Hungary).
4. Blais J.F., Auclair J.C., Tyagi R.D., (1992), *Can. J. Microbiol.*, 38(3), 181 – 187.
5. Pivovarova T.A., Golovacheva R. S., (1985), *Biogeochemistry of Metals*, Eds. Karavaiko G.I., Groudev S.N., 27 – 55, UNEP, Moscow.
6. Eds. Buchanan R.E., Gibbons E., (1974), *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*, 8th ed., Williams & Wilkins Co, Baltimore.
7. Suzuki I., Takeuchi T.L., Yuthasastrakosol T.D., Oh J.K., (1990), *Appl. Environ. Microbiol.*, 56, 1620 – 1626.
8. Cobley J.G., Cox J.C., (1983), *Microbiol. Rev.*, 47, 579 – 595.
9. Kelly D.P., (1982), *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.*, 298, 499 – 528.
10. Rodina A., (1968), *Mikrobiologiczne metody badania wód*, PWRL, Warszawa.
11. Bałazowa W.W., (1974), *Mikoplazmy i żelazobakterii*, Nauka, Moskwa.
12. Dubinina G.A., (1976), *Izw. AN SSSR, Seria Biologiczeskaja*, 4, 575 – 592.
13. Silverman M.P., Lundgren D.G., (1959), *J. Bacteriol.*, 77, 642 – 647.
14. Waksman S.A., Joffe J.S., (1922), *J. Bacteriol.*, 7, 239 – 256.
15. Eds. Karawajko G.I., Rossi G., Agate A., Grudew S., Awakjan Z.A., (1989), *Biogeochemiologija mietalłow. Prakticzeskoje rukowodstwo*, GKNT, Moskwa.
16. *Standard methods for the examination of water, sewage and industrial wastes. Nuisance bacteria. Iron bacteria. Sulfur bacteria*, (1955), Am. Pub. Health Assoc., INC, New York.
17. Minczewski J., Marczenko Z., (1976), *Analiza ilościowa*, PWN, Warszawa.
18. Williams W.J., (1985), *Oznaczanie anionów*, PWN, Warszawa.
19. Cwalina B., Dzierżewicz Z., Farbiszewska T., Bułaś L., (1993), *Fizykochem. Probl. Mineralurgii*, 27, 205 – 218.
20. Brierley J.A., Le Roux N.W., (1977), *Conference Bacterial Leaching*, Ed. Schwartz W., GBH Monogr., 4, 55 – 66, Verlag Chemie, Weinheim, New York.
21. Orłowska B., Gołąb Z., Starosta J., (1980), *Rudy. Metale*, 2(57), 495 – 498.
22. Chrostowska D., Goss M., Buszman E., (1981), *Fizykochem. Probl. Mineralurgii*, 13, 215 – 226.
23. Cwalina B., Dzierżewicz Z., (1991), *Acta Biol. Cracov.*, 33, 1 – 11.

The ability of biotransformation of inorganic sulphur compounds by selected strains of autotrophic and mixotrophic sulphur and iron bacteria

Summary

The possibilities of oxidation of ferrous ions, sulphur, thiosulphate and sulphide minerals by autotrophic bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* F26 – 77 and *Thiobacillus thiooxidans* T29 – 77 as well as mixotrophic bacteria *Siderocapsa* sp. 26 – 1(1) and *Sulfobacillus* sp. 26 – 9(1) were demonstrated. The mixtures of each ferrous ion oxidizing strain and *Thiobacillus thiooxidans* were not more effective than the simple strains. The presence of ferrous ions stimulated the sulphur oxidizing activity of mixotrophic bacteria strains, especially of *Siderocapsa* sp. 26 – 1(1).

Key words:

biotransformation, sulphur compounds, *Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans*, *Siderocapsa*, *Sulfobacillus*.

Adres dla korespondencji:

Beata Cwalina, Katedra Biochemii i Biofizyki, Śląska Akademia Medyczna, ul. Narcyzów 1, 41 – 200 Sosnowiec.