

بررسی نقش سینتیک در بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در فلوتاسیون

اسماعیل جرجانی
دانشجوی دکترا

بهرام رضایی
دانشیار

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی

چکیده

در طی عملیات فلوتاسیون، بازیابی با تغییر پارامترهایی مانند pH، غلظت و نوع کلکتور، غلظت و نوع بازداشت کننده، درصد جامد در پالپ، و بسیاری دیگر، افزایش، کاهش و یا بدون تغییر باقی می‌ماند. در این راستا سعی گردیده تا با استفاده از سینتیک فلوتاسیون پارامترهای یاد شده بهینه و سپس زمان بهینه توقف پالپ نیز برای چنین مدلی محاسبه گردد. از بازدهی جدایش^۱ به منظور کنترل، تعیین و انتخاب پارامتر مناسب استفاده گردیده است. مطالعات آزمایشگاهی انجام شده نشان می‌دهد که چنانچه شرایط بهینه زیر برقرار باشد، می‌توان به جدایش ایده آلی (S.E = ۸۷٪) دست یافت.

$$\text{pH} = 9$$

بازداشت کننده: (سیلیکات سدیم) به میزان ۱۷۵۰ (g/t)

کلکتور: (Aero۸۲۵ + ۸۲۵) به میزان ۱۰۰۰ (g/t)

گردش روتور: ۱۰۰۰ (rpm)

درصد جامد: ۲۳

زمان بهینه خردایش جهت دستیابی به d_{۸۰} مورد نظر (۷۵ میکرون): ۱۴ دقیقه

The Optimization Studies of Flotation Parameters Using the Flotation Rate Data

B. Rezai
Associate Professor

Mining and Metallurgical Engineering Department
Amirkabir University of Technology

E. Jorjani
Ph.D. Student
Azad University

Abstract

During the flotation operation, recovery may increase, decrease or remain constant with variation of parameters like pH, type and concentration of collector, type and concentration of depressant, % solid in pulp and many others. In this studies the attempts have been made to use the flotation rate data to optimize the above parameters and on account of this, the optimum RTD for such model have been determined. In order to control, evaluate and select the suitable parameter, the separation optimized conditions:

PH: 9

Depressant: 1000 (g / t)

r.p.m: 1000

%Solid: 23

Time of d₈₀ = 75: 14 min

It is possible to achieve S.E = 87 %

مقدمه

از ثابت سینتیک علاوه بر تعیین زمان بهینه فلوتاسیون و مسائل مربوط به طراحی مدار و کنترل سیستم، در بهینه سازی نوع و غلظت مواد شیمیایی و دیگر پارامترهای اساسی فلوتاسیون نیز می توان استفاده کرد.

۱- مطالعات آزمایشگاهی

۱-۱- نمونه برداری و تهیه نمونه معرف

نمونه برداری به روش لوله ای از انبار باطله موجود در معدن باریت کاشان انجام گرفته است. در این روش با توجه به نحوه پراکندگی مواد باطله، لوله ای به طول ۱/۵ متر را در فواصل ۳ متری از یکدیگر و به طور موازی و قائم از سطح تا عمق به داخل توده وارد نموده و نمونه کلی تهیه گردیده است.

از نمونه های به دست آمده، با استفاده از جداکننده شانه ای^۷ و سپس روش مخروط و چهار قسمتی کردن، نمونه ای معرف با وزن و مشخصات مورد نظر تهیه گردیده است.

۱-۲- خردایش

خردایش توسط سنگ شکن استوانه ای و آسیای میله ای انجام گرفته است. ابتدا توسط سنگ شکن مواد تا ابعاد زیر ۳/۳ میلی متر خرد گردیده (۸۰ d محصول معادل ۱۹۵۰ میکرون) و سپس محصول بدست آمده، توسط آسیای میله ای با بار خردکننده ۲۲ کیلوگرم در زمان های متفاوت جهت دستیابی به درجه آزادی مطلوب، مورد خردایش قرار گرفته است. در شکل (۱) منحنی های دانه بندی محصولات سنگ شکن و آسیا نشان داده شده است.

۱-۳- آزمایشات فلوتاسیون

۱-۳-۱- مدل مورد استفاده

یکی از موارد کاربرد سینتیک فلوتاسیون، بهینه سازی پارامترهای مؤثر در آن است. علاوه بر این، زمان بهینه توقف ماده معدنی در سلول نیز با این پارامتر ارزیابی می گردد [۷ و ۸]. به طور کلی در مورد سلول غیر پیوسته می توان معادله (۲) را ارائه نمود:

$$\frac{dc}{dt} = -kc \quad (2)$$

در بررسی سینتیک معمولاً دو نوع حرکت در نظر گرفته می شود. حرکت نوع اول که در اثر تحولات شیمیایی حاصل می شود و تغییرات خواص ماده را به دنبال دارد. در صورتی که حرکت نوع دوم فقط تغییر مکان فیزیکی ذرات را بدون تغییر در ماهیت و خواص آنها باعث می گردد [۱]. از آنجا که سرعت پیشرفت تحولات معمولاً به نحوه انجام هر دو حرکت وابسته است، لذا در نظر گرفتن انواع حرکت به منظور تشریح فرایندهای سینتیکی امری ضروری است. سینتیک به دو نوع شیمیایی و انتقال تقسیم می گردد. بررسی و تعیین سرعت انجام واکنش ها و تحولات شیمیایی در حوزه عملکرد سینتیک شیمیایی مطرح می شود، در صورتی که سینتیک انتقال، پدیده هایی چون نفوذ و انتقال ماده طریق را از جا به جایی مورد بررسی قرار می دهد [۱].

مطالعه سینتیک فلوتاسیون کلیه پارامترهایی را که بر سرعت محصول واکنش تأثیر می گذارند را در بر می گیرد و چنین سرعتی به صورت بازیابی مطلق بر زمان تعیین می گردد.

اولین مقاله مربوط به سینتیک فلوتاسیون در سال ۱۹۲۵ توسط «گارسیا زانیکا»^۱ در شیلی منتشر گردید و طبق نظریه وی، بازیابی به شکل یک تابع نمایی با زمان ارتباط دارد [۲]. علاقه به سینتیک «آرپیتر»^۲ را به احیاء نظریه «گارسیا» واداشت. وی مقدار ماده معدنی انتقال یافته به بخش کف را تابع مستقیمی از غلظت آن ماده دانسته و معادله (۱) را ارائه نموده است [۳]:

$$\frac{dc}{dt} = k(C)^n = k(R^* - R)^2 \quad (1)$$

که در آن:

K: ثابت سینتیک

C: غلظت ماده معدنی

n: درجه واکنش شیمیایی است که معادل ۲ در نظر گرفته می شود.

R: بازیابی در زمان t

R*: بازیابی در زمان بی نهایت است.

این معادلات توسط افراد دیگری همچون موریس^۳، هوکی^۵، ایمازوم^۶ و دیگران مورد بحث و انتقاد قرار گرفت و به تدریج منجر به تشکیل مدل های سینتیکی با شرایط کاربردی متفاوت گردید [۴، ۵ و ۶].

که در آن:

c: غلظت ماده معدنی در حال فلوته شدن در زمان (t) می باشد.

با توجه به رابطه (۲) می توان معادله (۳) را ارائه نمود:

$$\frac{dc}{dt} = -kc \Rightarrow \frac{dc}{c} = -kdt \Rightarrow \ln c = -kt + A \Rightarrow \ln c = -kt + \ln c_0$$

$$\Rightarrow \ln \frac{c}{c_0} = -kdt \Rightarrow \frac{c}{c_0} = e^{-kt} \quad (3)$$

با توجه به تعریف بازیابی:

$$R = \frac{c_0 - c}{c_0} = 1 - \frac{c}{c_0} \quad (4)$$

بنابراین از روابط (۲) و (۴)، رابطه (۵) به دست می آید:

$$R = 1 - e^{-kt} \Rightarrow 1 - R = e^{-kt} \Rightarrow \ln(1 - R) = -kt \quad (5)$$

با رسم منحنی $\ln(1 - R)$ (محور قائم) در مقابل t (محور افقی)، k یا ثابت سینتیک را می توان محاسبه کرد [۷] و [۸]. با توجه به اینکه با افزایش زمان، میزان بازیابی کانی مطلوب (R_A) و بازیابی باطله (R_B) با نسبت های متفاوت افزایش می یابد، لذا پارامتری تحت عنوان بازدهی جدایش تعریف می گردد که توسط آن می توان مطابق با رابطه (۷) زمان بهینه فلوتاسیون را محاسبه نمود.

$$S.E. = R_A - R_B = \text{بازیابی باطله} - \text{بازیابی کانی مطلوب} \\ \Rightarrow S.E. = (1 - e^{-k_A t}) - (1 - e^{-k_B t}) \quad (6)$$

در شرایط ایده آل بازدهی جدایش بایستی ماکزیمم باشد بنابراین:

$$\frac{d(S.E.)}{dt} = 0 \Rightarrow k_A e^{-k_A t} = k_B e^{-k_B t} \Rightarrow t_{(opt)} = \frac{\ln K_A - \ln K_B}{K_A - K_B} \quad (7)$$

مطالعات انجام شده نشان می دهد که R به طور مستقیم با $(1 - e^{-kt})$ متناسب نیست. بنابراین:

$$R = RI(1 - e^{-kt}) \quad (8)$$

که در آن:

RI: بازیابی در زمان بی نهایت است.

بنابراین زمان توقف بهینه به صورت معادله (۹) ارائه می شود:

$$t_{(opt)} = \frac{1}{K_A - K_B} \ln \left(\frac{K_A RI_A}{K_B RI_B} \right) \quad (9)$$

برآوردی از RI را می توان با رسم منحنی بازیابی - زمان بدست آورد. چنین محاسباتی با رسم منحنی $\left(\frac{RI - R}{RI} \right)$ نسبت به زمان (t) تأیید می گردد.

اگر مقدار RI بیش از حد بهینه باشد، منحنی به سمت بالا و اگر RI کوچکتر از این حد باشد به سمت پایین منحرف می گردد. در نهایت ثابت سینتیک از شیب خط مستقیم محاسبه و زمان توقف بهینه از رابطه (۹) محاسبه می گردد.

برای محاسبه زمان توقف بهینه نموداری نیز ارائه شده است که در آن فاکتور سرعت فلوتاسیون به صورت تابعی از زمان رسم می شود [۷].

در این نمودار محل تلاقی دو منحنی مربوط به کانی مطلوب و گانگ تعیین کننده زمان بهینه است.

۱-۳-۲- آزمایش های فلوتاسیون و بهینه سازی پارامترها

در این مبحث پارامترهای مؤثر در فلوتاسیون مورد بررسی قرار گرفته و شرایط بهینه با توجه به S.E بدست آمده است. پارامترهای مورد بررسی عبارتند از:

- نوع کلکتور و میزان مصرف آن

- نوع بازداشت کننده و میزان مصرف آن

- pH

- سرعت چرخش دستگاه

- درصد جامد

- دانه بندی محصول آسیا

الف- بررسی و بهینه سازی pH

جهت تعیین pH بهینه، با ثابت نگه داشتن پارامترهای

زیر:

- درصد جامد: ۲۳

- بازداشت کننده: سیلیکات سدیم به میزان ۱۵۰۰ گرم بر تن

- دور چرخش دستگاه: ۱۰۰۰ دور بر دقیقه

- دانه بندی بار ورودی به فلوتاسیون: ۵۷ میکرون

برای باریت و باطله رسم گردیده که در شکل (۹) نشان داده شده است.

جدول (۳) بهینه سازی پارامترها با استفاده از بازدهی جدایش.

ردیف	پارامتر	مقادیر یا نوع	بازدهی جدایش	پارامتر بهینه
۱	pH	۸	۳۵	pH=۹
		۹	۷۶/۹	
		۱۰	۷۳	
۲	نوع بازداشت کننده	CMC	منفی	سیلیکات سدیم
		سیلیکات سدیم	۷۶/۹	
۳	مقطار بازداشت کننده (pH)	۱۲۵۰	۷۲	۱۷۵۰
		۱۵۰۰	۷۶/۹	
		۱۷۵۰	۸۷	
۴	نوع کلکتور مصرفی	(AERO) ۸۷	(AERO) ۸۷	۸۷
		(AERO) ۴۹	(AERO) ۴۹	
		FAST-۲۰ CMC ۱۹۹	منفی ۴۲/۵	
۵	میزان کلکتور مصرفی (pH)	۷۵۰	۷۴	۱۰۰۰
		۱۰۰۰	۸۷	
		۱۲۵۰	۸۰	
۶	دور دستگاه (r.p.m)	۸۰۰	منفی	۱۰۰۰
		۱۰۰۰	۸۷	
		۱۲۰۰	۸۰	
۷	درصد جلد	۲۰	۸۶/۵	۲۳
		۲۳	۸۷	
		۲۵	۷۴/۵	
۸	زمان خردایش (دقیقه)	۱۱	منفی	۱۴
		۱۴	۸۷	
		۱۶	۷۰/۵	

۱-۳-۳- نقش سینتیک در محاسبه زمان بهینه

توقف پالپ در سلول

با استفاده از شکل (۹) می توان ثابت های سینتیک باریت و باطله را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$k_b = \frac{\ln 0/1}{0/5} = 4/6.051$$

و در pH های ۸، ۹ و ۱۰ آزمایش های متفاوتی انجام گردید که نتایج حاصل در جدول (۱) درج شده است. کف گیری در فواصل ۲۰ ثانیه و در مجموع ۹۰ ثانیه انجام گردیده است.

با توجه به جدول (۱) نمودار بازیابی - زمان را برای باطله و باریت رسم نموده (شکل (۲)) و RI تخمین زده می شود. سپس با رسم منحنی $\left(\frac{RI-R}{RI}\right)$ نسبت به زمان RI به طور دقیق محاسبه می شود (اشکال ۳ تا ۸) پس از محاسبه RI باریت و باطله، بازدهی جدایش را می توان محاسبه نمود که نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۱) آزمایش فلوتاسیون در pH های متفاوت.

مجموع	وزن (٪)	عیار (٪)	بازدهی (٪)	بازدهی تجویزی (٪)	بازدهی تجویزی باطله (٪)
C1	۵۶/۸۸	۸۱/۱۵	۸۹/۵۵	۸۹/۵۵	۱۰/۴۵
C2	۹/۴۵	۲۵/۹۱	۸/۲۲	۹۷/۹۷	۱۲/۴۸
C3	۲/۳۱	۲۲/۳	۲/۰۲	۱۰۰	۱۲/۴۸
باطله	۲۹/۳۶

جدول (۲) بازدهی جدایش در pH های مختلف.

pH	RI باریت (٪)	RI باطله (٪)	بازدهی جدایش (٪)
۸	۹۴	۵۹	۳۵
۹	۹۸/۸	۲۱/۹	۷۶/۹
۱۰	۹۷	۲۴	۷۳

باتوجه به اینکه بازدهی جدایش برای $pH = 9$ از همه زیادتر و معادل ۷۶/۹ درصد می باشد، لذا این pH به عنوان بهینه منظور گردیده است.

ب- بررسی و بهینه سازی سایر پارامترها

مشابه حالت الف، بازدهی جدایش برای کلیه پارامترهای مورد بحث محاسبه گردیده و سپس پارامتر بهینه تعیین شده است. نتایج حاصل در جدول (۳) درج شده است.

تحت شرایط بهینه (ستون ۵ جدول (۳)) آزمایش نهایی انجام و نتایج حاصل در جدول (۴) درج شده است. تحت این شرایط منحنی $\left(\frac{RI-R}{RI}\right)$ نسبت به زمان

$$k_t = \frac{\ln \cdot / 2}{\cdot / 5} = 3/2188$$

k_b : ثابت سینتیک باریت
 k_t : ثابت سینتیک باطله

همچنین با توجه به اینکه بازیابی بی نهایت برای باریت و باطله تحت شرایط بهینه به ترتیب برابر با ۱۰۰ و ۱۳ درصد محاسبه گردیده است، لذا با استفاده از رابطه (۸) زمان بهینه توقف پالپ در سلول به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$t(\text{opt.}) = \frac{1}{k_b - k_t} \ln \left(\frac{RI_b k_b}{RI_t k_t} \right)$$

$$t(\text{ینه}) = \frac{1}{0.0004 - 0.0003} \ln \left(\frac{1/4/6.051 - 3/2188}{1/100 \times 4/6.051 / 13 \times 3/2188} \right) = 1/73 \text{ دقیقه}$$

جدول (۲) آزمایش فلوتاسیون تحت شرایط بهینه.

پایه	بازیابی (%)	بازیابی (%)	بازیابی (%)	وقت (د)	معمول	pH
۲۸	۷۲	۷۲	۸۸۸۲	۲۷۹۸	C1	۸
۲۲/۰۱	۸۵/۹۹	۱۳/۹۹	۵۸/۲	۱۷۵	C1	۹
۲۶/۹۲	۹۲/۰۸	۲۰/۰۹	۲۸/۲۱	۶	C1	
-	۱۰۰	۷/۹۲	۷/۲۱	۲۰/۵۲	کله	
۱۲/۵۶	۸۵/۹۹	۸۵/۹۹	۸۵/۰۲	۵۲/۶۶	C1	۹
۱۸/۳۲	۹۵/۹۹	۱/۵	۵/۰۸	۱۷۱	C1	
۲۰/۶	۹۸/۰۲	۲/۰۸	۱۵/۹۹	۲/۹۵	C1	
-	۱۰۰	۷/۹۸	۲/۹۰	۲۹/۲۹	کله	
۱۲/۰۸	۸۷/۹۲	۸۷/۹۲	۷/۱۳	۱۷/۹۱	C1	۱۰
۱۶/۱۸	۹۵/۹۸	۷/۲۶	۲/۶۰	۱/۰۵	C1	
۲۰/۹۲	۹۶/۵۶	۷/۲۸	۱۷/۵۹	۲/۲۶	C1	
-	۱۰۰	۲/۲۲	۵/۹۲	۲/۱۷	کله	

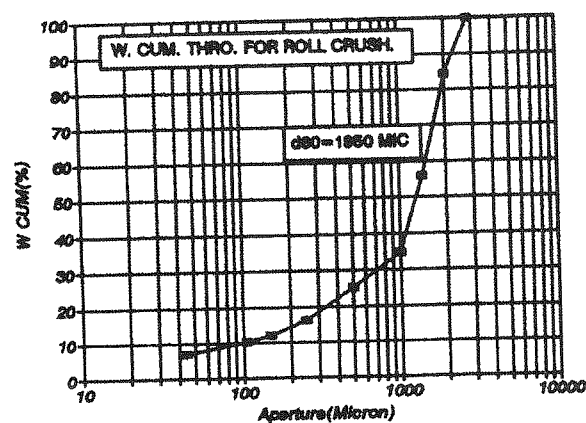
(۳) ترکیب دو کلکتور AERO۸۲۵+۸۴۵ به میزان ۱۰۰۰ گرم بر تن به عنوان کلکتور بهینه در نظر گرفته شده است. در غلظت های کمتر از ۱۰۰۰ گرم بر تن ممکن است به علت عدم تشکیل همی میسل بازدهی جدایش کاهش یابد و مصرف بیش از ۱۰۰۰ گرم بر تن نیز بازدهی جدایش را کاهش دهد.

(۴) گردش روتور به میزان ۱۰۰۰ دور بر دقیقه بهینه می باشد. در دوره های ۸۰۰ و ۱۲۰۰ (کمتر و زیاده تر از حد بهینه) به دلیل مناسب نبودن برخوردها بین حباب هوا و ذرات از یک سو و افزایش یا کاهش تعداد و ابعاد حباب ها از سوی دیگر بازدهی جدایش کاهش می یابد.

(۵) درصد جامد ۲۳ بهترین شرایط را از نقطه نظر بازدهی جدایش حاصل می کند. کاهش درصد جامد به ۲۰، نتایج مشابه حالت ۲۳ درصد و افزایش درصد جامد به ۲۵ باعث کاهش بازدهی جدایش می گردد.

(۶) زمان خریدایش بهینه توسط آسیا، ۱۴ دقیقه و با بار خردکننده ۲۲ کیلوگرم تعیین گردید. (۸۰ d بهینه ۵۷ میکرون). کاهش زمان خریدایش به ۱۱ دقیقه باعث می گردد تا ذرات به درجه آزادی مطلوب نرسند و افزایش زمان خریدایش به مرز ۱۶ دقیقه، افزایش نرمه را به دنبال دارد که در کاهش بازدهی جدایش بی تأثیر نیست.

(۷) پس از انجام مراحل فوق زمان بهینه توقف ماده معدنی در داخل سلول نیز معادل ۱۰۴ ثانیه تعیین گردید.



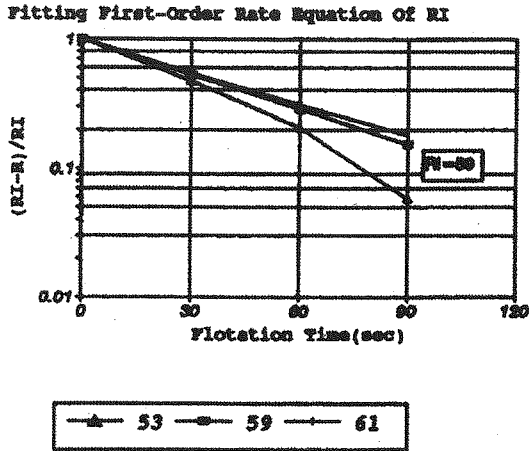
(الف)

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

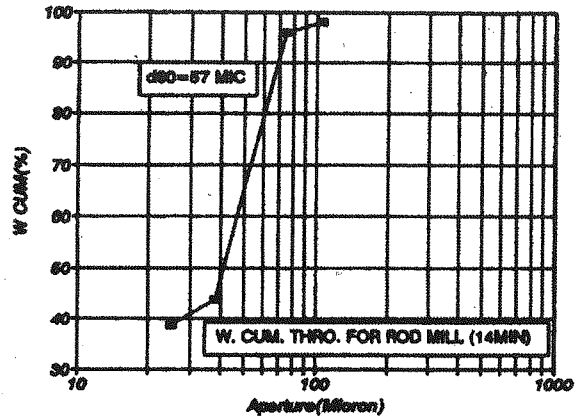
باتوجه به مطالعات انجام شده بر روی سینتیک فلوتاسیون باریت تحلیل های زیر را می توان ارائه نمود:

(۱) با استفاده از بازدهی جدایش ، $pH = 9$ به عنوان pH بهینه تعیین گردید. در pH های کمتر و یا بیشتر از ۹ به دلیل تغییر بار سطحی ، بازیابی و در نتیجه بازدهی جدایش باریت کاهش می یابد.

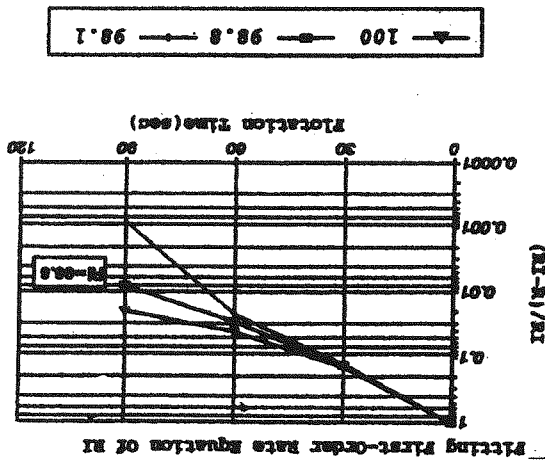
(۲) سیلیکات سدیم به میزان ۱۷۵۰ گرم بر تن به عنوان بازداشت کننده مطلوب تعیین گردید. C.M.C. علاوه بر بازداشت سیلیکات ها، باریت را نیز بازداشت می کند.



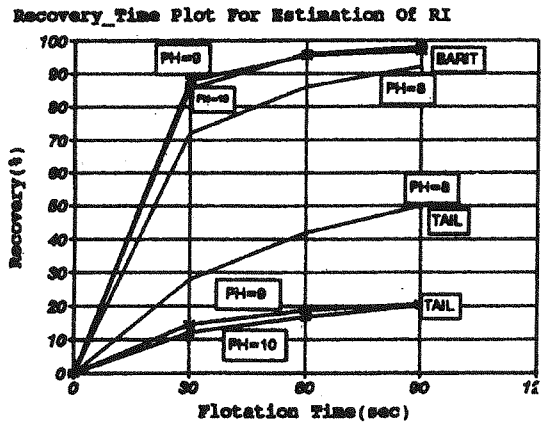
شکل (۲) منحنی محاسبه دقیق RI باطله در $pH = 8$.



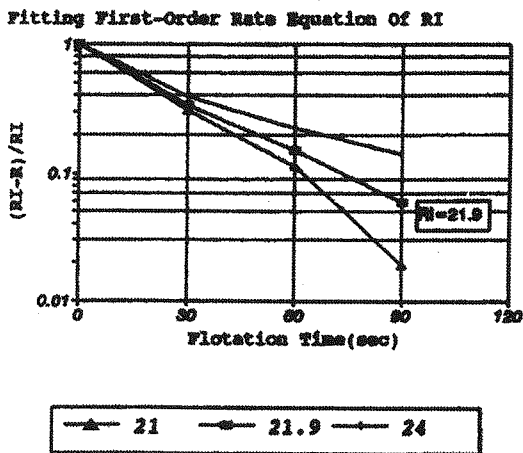
شکل (۱) منحنی های دانه بندی محصولات سنگ شکن استوانه ای و آسیا.



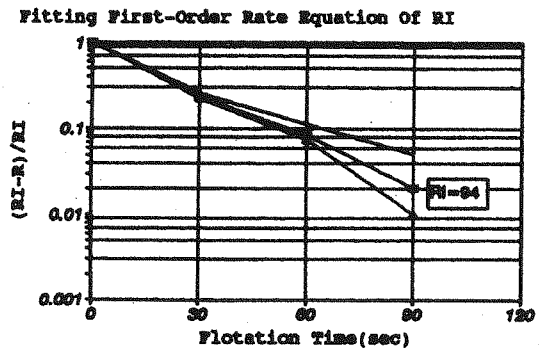
شکل (۵) منحنی محاسبه دقیق RI باریت در $pH = 9$.



شکل (۲) منحنی بازیابی - زمان برای برآورد اولیه RI در pH های ۸، ۹ و ۱۰.

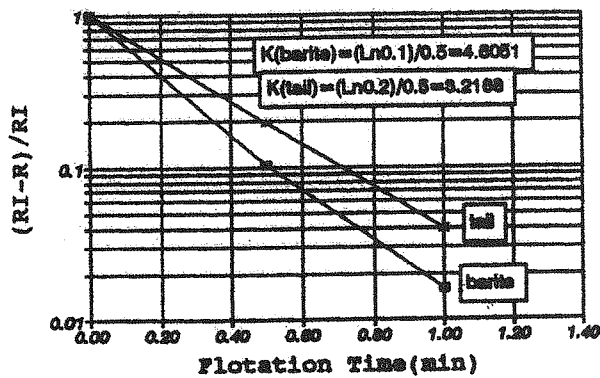


شکل (۶) منحنی محاسبه دقیق RI باطله در $pH = 9$.



شکل (۳) منحنی محاسبه دقیق RI باریت در $pH = 8$.

Typical First-Order Rate Plot For Barite And Tail

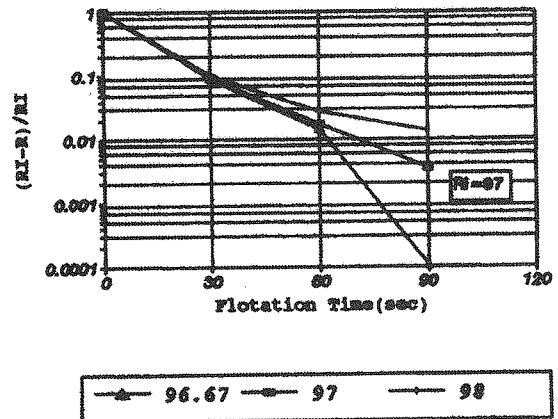


شکل (۹) محاسبه ثابت سینتیک باریت و باطله.

زیر نویس ها

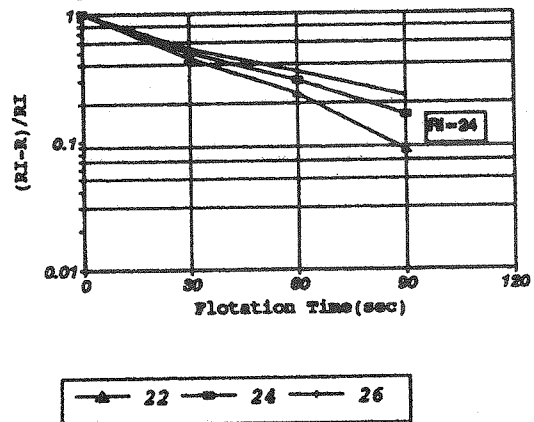
- 1- Separation Efficiency
- 2- Gareiazunga
- 3- Arbiter
- 4- Morris
- 5- Hukki
- 6- Imaizumi
- 7- Riffle

Fitting First-Order Rate Equation of RI



شکل (۷) منحنی محاسبه دقیق RI باریت در pH = ۱۰.

Fitting First-Order Rate Equation of RI



شکل (۸) منحنی محاسبه دقیق RI باطله در pH = ۱۰.

مراجع

- [5] Hukki, R. T. "Discussion of ref," (1953) ibid. 5, pp: 1122-1124.
- [6] Imaizumi, T. and Inoue, T. "Consideration's cinetiques sur la Flottation a la mousse", (1963), Proceedings VI th Int. Miner Process Congress (cannes), pp: 699-715.
- [7] Gordon E. Agar and J. J. Barret "The use of flotation rate data to evaluate reagents", (1993) CLM Bulletin.
- [8] Gordon E. Agar and J.J. Barret. "The use flotation rate data to evaluate reagents", (1983) CIM BULL, 76, pp: 157-162.

- [۱] صدرنژاد، خطیب الاسلام، فرآیندهای سینتیک در مهندسی مواد و متالورژی، مؤسسه انتشارات امیرکبیر (۱۳۷۲)
- [2] Garcia Zuniga, "The efficiency obtained by flotation is an exponential function of time", Boletin minero de la sociedad nacional de minero 47, santiago, pp: 83-86 (1935).
- [3] Arbiter, N. "Flotation rates and flotation efficiency", (1951), Min, Eng. 3, pp: 791-796.
- [4] Moris, T. M. "Measurement and evaluation of the rate of flotation size", (1952). Min. Engg. 4, pp: 794-798.