



Orijinal Araştırma / Original Research

KOLON VE MEKANİK FLOTASYON HÜCRELERİNDE KÖPÜRTÜCÜ MİKTARI VE TÜRÜNÜN SU İLE TAŞINIMA ETKİSİ

INFLUENCE OF FROTHER CONCENTRATIONS AND TYPES ON ENTRAINMENT IN COLUMN AND CONVENTIONAL FLOTATION CELLS

Hülya Kurşun^a, İbrahim Erdoğan^{a*}

^a Cumhuriyet Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, SİVAS

Geliş Tarihi / Received : 02 Mart / March 2017

Kabul Tarihi / Accepted : 21 Nisan / April 2017

Anahtar Sözcükler:

Sölestit,
Kalsit,
Su ile taşınım,
Mekanik flotasyon,
Kolon flotasyonu.

ÖZ

Su ile taşınım (entrainment), tanelerin köpüğe bağlanmadan suyun sürüklenme etkisi ile köpüğe taşınan malzemeyi ifade eder. Genellikle mekanik ve kolon flotasyonu sistemlerinde ihmal edilmektedir. Bu çalışmada, yüksek saflıktaki kalsit (%97,78 CaCO₃) ve sölestit (%97,20 SrSO₄) minerallerinin karışımı (1:1 oranında) ile bir grup deneyler yapılmıştır. Farklı köpürtücü tür ve konsantrasyonlarında Denver tipi mekanik flotasyon makinası kullanarak su ile taşınım faktörleri hesaplanmış, Kursun (2017)'de kolon hücresi ile yapmış olduğu deneylerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Kolon ve mekanik hücre deney sonuçları karşılaştırıldığında su ile taşınım faktörü kolon hücresinde en düşük değere ulaşmıştır.

Mekanik Flotasyon; $Pi_{MIBC} (0,471) < Pi_{\text{Çam yağı}} (0,495)$

Kolon Flotasyonu; $Pi_{MIBC} (0,365) < Pi_{\text{Çam yağı}} (0,480)$

Sonuç olarak, köpürtücü miktarı ve türü her iki flotasyon hücresinde de görüldüğü gibi su ile taşınım faktörünü, konsantrasyon verim ve seçiciliğini önemli derecede etkilemektedir. Kolonda 80 g/t MIBC köpürtücü kullanılması durumunda minimum su ve kalsit verimine ulaşılmıştır (4 dakika kalma süresi). Kirjaveinen (1988;1989) modeli, hidrofilik tanelerin su ile taşınım faktörünü (Pi) belirlemek için kullanılmıştır.

ABSTRACT

Entrainment refers to materials which are water-entrained without attaching to the foam. It is usually neglected in conventional and column flotation systems. In this study, a group of experiments were carried out with a mixture (1:1 ratio) of artificial minerals of high purity calcite (97,78% CaCO₃) and celestite (97,20% SrSO₄). Entrainment were calculated using Denver type flotation machines in different frother types and concentrations, and compared with the results of the experiments in Kursun (2017) at column flotation. Entrainment factor calculated for column flotation was lower than the one for conventional flotation.

Conventional Flotation; $Pi_{MIBC} (0,471) < Pi_{\text{Pine Oil}} (0,495)$

Column Flotation; $Pi_{MIBC} (0,365) < Pi_{\text{Pine Oil}} (0,480)$

Consequently, the frother concentration and type significantly affect the entrainment, recovery and selectivity of concentrate as it is seen in both flotation cells. Minimum water and calcite recoveries were provided with 80 g/t of frother concentration for MIBC in column flotation. (4th minute residence time). Kirjaveinen (1988;1989) model was used for describing a specific entrained factor (Pi) of hydrophilic particles in this study.

Keywords:

Celestite,
Calcite,
Entrainment,
Conventional flotation,
Column flotation

* İlgili yazar: hkursun@cumhuriyet.edu.tr

GİRİŞ

Düşük tenörlü cevherlerin ekonomik olarak kullanılmasına öğütme teknolojisinde elde edilen ilerlemeler büyük ölçüde katkı sağlasa da, doğada cevher tenörünün sürekli azalması ile çok ince boyutlarda cevherden mineral tanelerini ayırmak madencilik sektöründe oldukça güç ve maliyetli olmaktadır.

Flotasyon işlemi, hücre içinde farklı yüzey özelliklerine sahip tanelerin, pülp içerisinde oluşturulan hava kabarcıkları yardımıyla birbirinden ayrılması sonucunda gerçekleşmektedir. Köpük flotasyonunun temeli, pülp içindeki hava kabarcığını yükseltmek, hava-sıvı ara yüzeyini oluşturup, seçimliliği sağlamaktır.

Mekanik ve kolon flotasyon hücreleri, ince boyutlarda geliştirilen yeni tasarımlara rağmen halen yaygın olarak kullanılmaktadır. İlk olarak mekanik flotasyon hücrelerinde çalışılmıştır. 1960'larda, Boutin ve Tremblay tarafından kolon flotasyonu patentlenmiş, Kanada kolonlarının ilk tanımları ve test çalışmaları Wheeler (1966), Boutin ve Wheeler (1967) tarafından yapılmıştır. Tesis performansı açısından oldukça başarılı sonuçlar elde edilmesinden dolayı farklı türdeki minerallerin zenginleştirilmesinde kolonlar yaygın olarak kullanılmıştır (Finch ve Dobby, 1990). Bu dönemlerde, Çin'de 1961 yılında (Hu ve Liu, 1988) ve eski SSCB'de farklı tasarımlarda kolonlar kullanılmıştır (Reddy vd., 1988). Pierre Boutin mekanik flotasyon hücrelerinde pülpün süspansiyonda tutulması için pervanelerin dönüşü ve hava akışı ile yaratılan türbülansın, ince gang tanelerinin konsantreye kaçması ile konsantreyi kirlettiğini belirtmiş, buna alternatif olarak tanelerin, türbülansın olmadığı bir ortamda süspansiyonda tutulabilmesi için, ince, uzun ve yüksek bir hücreye beslenmesi gerektiğini açıklamıştır (Finch ve Dobby, 1990). Kolon flotasyonu hakkında 1980'li yıllara kadar Sastry ve Fuerstenau (1972) kolonların modellenmesi, Narasimhal vd. (1972) grafit zenginleştirilmesi, Mathieu (1972) molibdenit'in zenginleştirilmesi olmak üzere sadece üç çalışmanın gerçekleştirildiği görülmektedir (Finch ve Dobby, 1990).

Tanelerin konsantreye sürüklenmeleri (entrainment), hava kabarcığına bağlanarak ve hem hidrofilik hem de hidrofobik taneler için hava kabarcığına bağlanmadan gerçekleşmektedir. Hidrofobik taneler için iki mekanizmada gerçekleşirken, hidrofilik taneler için sadece su ile taşınım söz konusu olmaktadır. Hidrofilik

tanelerin tamamının konsantreye su ile taşındığının kabul edilmesinin oldukça basit bir işlem olduğu düşünülmekte ancak, hidrofobik tanelerin konsantreye su ile taşınmasının zor bir proses olacağı birçok araştırmacı tarafından belirtilmektedir (Wark, 1981; Warren, 1985; Ross, 1990,1991; Gülsoy vd., 1995; Gülsoy, 1999, 2005).

Hidrofilik tanelerin konsantreye su ile taşınarak geldiği kabul edilmiş ve hidrofobik tanelerde olduğu gibi hız eşitlikleri kullanılarak taneler için farklı su ile taşınım modelleri geliştirilmiştir. Bu modellemeler genellikle su ve katı kazanımı arasında doğrusal bir ilişki kurulması ve bu doğrusal ilişkiye bağlı olarak değişmelerin oluşması temeline dayanmaktadır. İnce tanelerin konsantreye taşınmasında çok önemli etkisi olan su ile taşınım ilk olarak Gaudin vd., (1931) ve Johnson vd. (1974), tarafından incelenmiştir. Jowett (1966), konsantredeki serbest gang derişimi ile pülp içerisindeki serbest gang derişimi arasında bir ilişki olduğunu belirlemiştir. Johnson vd. (1974) de, pilot tesis üzerinde su ile kazanımı deneysel olarak çalışmışlar, su kazanım hızını ve sınıflama fonksiyonunu da kullanarak bir model geliştirmişlerdir. Su ve katı verimleri arasında parabolik bir ilişki olduğunu gözlemlemişler, sınıflandırma fonksiyonu olarak (C_F)'yi tanımlamışlardır (eşitlik 1).

$$(C_F) = \frac{\text{Konsantrede Serbest Gang Derişimi}}{\text{Pülpdeki Serbest Gang Derişimi}} \quad (1)$$

Kirjavainen (1988; 1989), çalışmasında bir transfer faktörü tanımlayarak buna bağlı bir model önermiş ve çeşitli mineraller kullanarak farklı bir yaklaşım geliştirmiştir. Çalışmasında, tane kütlesine bağlı olan transfer faktörünü eşitlik 2' de verildiği gibi tanımlamıştır.

$$P: 1-D \log(m) \quad (2)$$

Doğrusal ilişkinin hidrofilik minerallerin taşınımları arasında olmayacağını belirterek eşitlik 3' te ifade edilebilen bir model önermiştir.

$$R_i = 1 - \exp(-P_i R_w), \quad P_i = \ln(1 - R_i) / -R_w \quad (3)$$

R_i : hidrofilik malzeme verimi

P_i : sürüklenme faktörü, R_w : su verimi

1990'dan sonra su ile taşınım faktörü bir çok araştırmacı tarafından farklı matematiksel modeller kullanılarak tanımlanmıştır (Kirjavainen, 1988, 1989, 1992, 1996; Savassi vd., 1998, Zheng vd.,

2005a, 2005b, 2006; Yianatos vd., 2009; Yianatos ve Contreras, 2010; Konopacka ve Drzymala, 2010).

Flotasyonda su ile taşınımı önemli derecede etkileyen parametrelerden biri de köpürtücü, tür ve miktarlarıdır. Flotasyonda köpürtücüler, hava-sıvı ara yüzey gerilimini düşürerek köpük oluşmasını ve hava kabarcığının duyarlı olmasını sağlayan kimyasallardır. Toplayıcı özelliğine sahip olmalı, az miktarlarda kullanımı köpük yapmaya yeterli olmalı, ortamdaki minerallerden ve diğer kimyasallardan etkilenmemeli, minerali yüzeye taşıyabilir sağlamlıkta ve güçte olmalıdır. Suda homojen olarak dağılabilmeleri için suda çözünebilir ve flotasyon sisteminde minerallerden ve diğer kimyasallardan etkilenmemelidir. Mekanik ve kolon flotasyonu prosesinde köpürtücülerin flotasyona etkisi bir çok araştırmacı tarafından çalışılmıştır (Subrahmanyam ve Forsberg,1988; Hoşten ve Tezcan,1990; Goodall ve O'Connor 1992; Malysa, 1993; Tuteja vd., 1995; Rahal vd., 2001; Akdemir vd., 2005; Antunes Pita, 2015; Kursun, 2014, 2017).

Kursun (2014), yapmış olduğu çalışmasında, Kirjavainen (1988, 1989) modelini uygulayarak mekanik ve kolon flotasyonunda tane boyutunun ve köpürtücü miktarlarının su ile taşınım faktörüne etkisini incelemiş, kolon hücrelerinde su ile taşınım faktörünün daha az olduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışmada, Kursun (2014, 2017) çalışmasına ilave olarak Denver tipi mekanik flotasyon hücrelerinde köpürtücü miktarı ve türünün su ile taşınım faktörüne (*Pi*) etkisini belirlemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Kursun (2017)'de yapmış olduğu kolon flotasyonu deneyleri ile bu çalışmasını ilişkilendirerek kolon ve mekanik flotasyon hücrelerinde köpürtücü miktarı ve türünün su ile taşınım faktörüne etkisi incelenmiş, verim ve seçicilik açısından karşılaştırmıştır. Elde edilen sonuçlar Kirjavainen (1988, 1989)'ın belirlemiş olduğu model üzerine uygulanarak değerlendirilmiştir.

Flotasyonda temel amaç, konsantride maksimum verim ve seçicilik değerlerine ulaşmaktır. Konsantride genellikle en fazla kirliliği sağlayan ince boyuttaki tanelerin su ile taşınımı olduğundan, çalışmamızda bunu en aza indirmek için sistemi doğrudan etkileyen parametrelerden olan köpürtücü tür ve miktarının önemli bir etkiye sahip olduğu ortaya konmuş ve her iki flotasyon sisteminde de verim ve seçicilik üzerine etkileri araştırılmıştır. Neticede her iki sistemin ve çok daha farklı

türde köpürtücü türlerinin detaylı çalışılmasıyla, su ile taşınımın daha fazla azaltılacağı yönünde bu çalışmanın devam eden araştırmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

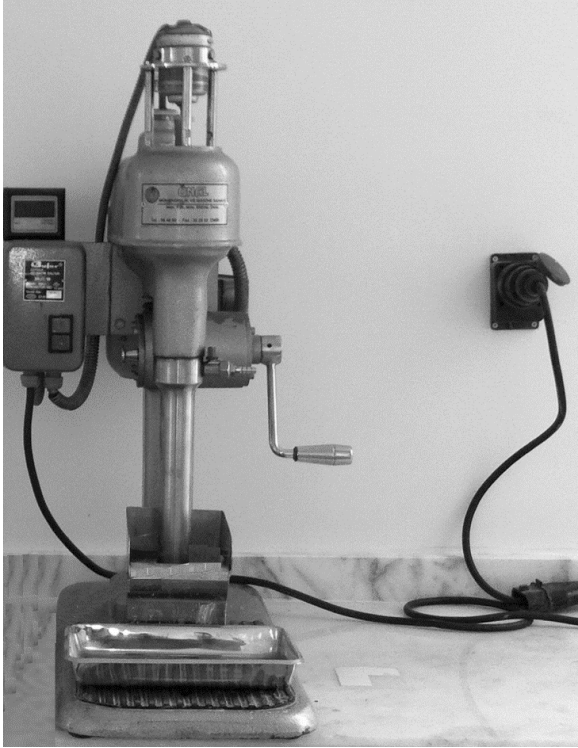
1. MALZEME VE YÖNTEM

Deneylerde, Sivas-Ulaş bölgesinden temin edilen (BMT Alçı A.Ş.) %97.78 CaCO₃ içerikli kalsit ile yine aynı bölgeden (Barit Madencilik A.Ş.) alınan 97.2% SrSO₄ içerikli sölestit (1:1) oranında karıştırılarak hazırlanan numuneler ile çalışılmıştır. Bil-yalı değirmen kullanılarak kalsitin tamamı -38µm tane boyuna indirilmiş, sölestit ise (-106+38 µm) boyut aralıklarında hazırlanmıştır. Sölestit ve kalsitin kimyasal analiz sonuçları (X-Ray Fluor-sans) Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Deneylerde kullanılan Sölestit ve Kalsit'in Kimyasal Analizi (Kursun, 2014)

	Bileşim	%
Sölestit	SrSO ₄	97.20
	CaSO ₄ .2H ₂ O ₄	2.32
	Diğerleri (Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ +MgO)	0.48
Kalsit	CaO	54.42
	Kızdırma Kaybı	43.36
	Diğerleri (MgO, Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ , Na ₂ O, SO ₃ , K ₂ O, SiO ₂ <0.01)	2.22

DeneySEL çalışmalarda, mekanik flotasyon makinası olarak 1 lt hücre kapasitesi olan Denver tipi flotasyon makinası (Ünal Mühendislik A.Ş.) kullanılmıştır (Şekil 1). Çalışma sırasında musluk suyunun pH değeri (pH: 7.8) NaOH kullanılarak pH:10'a ayarlanmıştır. Toplayıcı olarak anyonik toplayıcı olan Na-Oleat (600 g/t), köpürtücü olarak farklı miktarlarda (40 g/t, 80 g/t, 120 g/t,160 g/t) Çam yağı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda farklı köpürtücü miktarlarında ve türünde elde edilen ağırlıkça katı (105 °C) ve su miktarları hesaplanarak hidrofilik kalsit için Kirjavainen Modeli (1989) uygulanmış, su ile sürüklenme faktörü (*Pi*) hesaplanmıştır (eşitlik 3). Aynı zamanda, Kursun (2017)'de yapmış olduğu kolon flotasyonu deneyleri ile bu çalışmasını ilişkilendirerek kolon ve mekanik flotasyon hücrelerinde köpürtücü miktarı ve türünün su ile taşınım faktörüne etkisi incelemiş, verim ve seçicilik açısından karşılaştırma yaparak kolon flotasyonunun üstünlüklerini tanımlamıştır.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan Denver tipi mekanik flotasyon hücresi

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Denver Tipi Mekanik Flotasyon Hücresinde Köpürtücü Miktarı ve Türünün Su ile Taşınım Etkisi

Mekanik flotasyon hücresiyle yapılan deneylerde çalışılan sabit parametreler; %20 katı oranı, 1200 rpm karıştırma hızı, 4 dakika flotasyon süresi ve 600g/t Na-Oleat toplayıcı dozajı olarak belirlenmiştir. Köpürtücü miktarı ve türüne bağlı olarak elde edilen sonuçlar Çizelge 2’de verilmektedir. Çizelge 2’den de görüldüğü gibi, köpürtücü miktarı artırıldığında kalsit ve su verimi de artmıştır. 80 g/t Çam yağı kullanıldığında 4. dakika flotasyon zamanında sölestit kazanımı %66,91, tenör değeri ise % 74,03 olmaktadır. Oysa ki, aynı köpürtücü konsantrasyonlarında ve aynı flotasyon süresinde MIBC kullanılması durumunda, en yüksek sölestit verim (%78,92) ve tenör (%81,58) değerlerine ulaşılmıştır. Aynı zamanda su ile taşınım faktörü de 80 g/t MIBC kullanılması durumunda konsantrede en düşük kalsit kirlenmesini sağlamış ve P_i : 0,471 olarak Kirjevainen Modeli’ne göre hesaplanmıştır.

Böylece mekanik flotasyon hücresi kullanılarak

Çizelge 2. Mekanik flotasyon hücresinde flotasyon zamanına bağlı olarak farklı miktarlardaki Çam yağı ve MIBC’nin sölestit-kalsit-su verimi ve su ile taşınım faktörüne etkisi (sölestit(-106+38 µm), kalsit(-38µm))

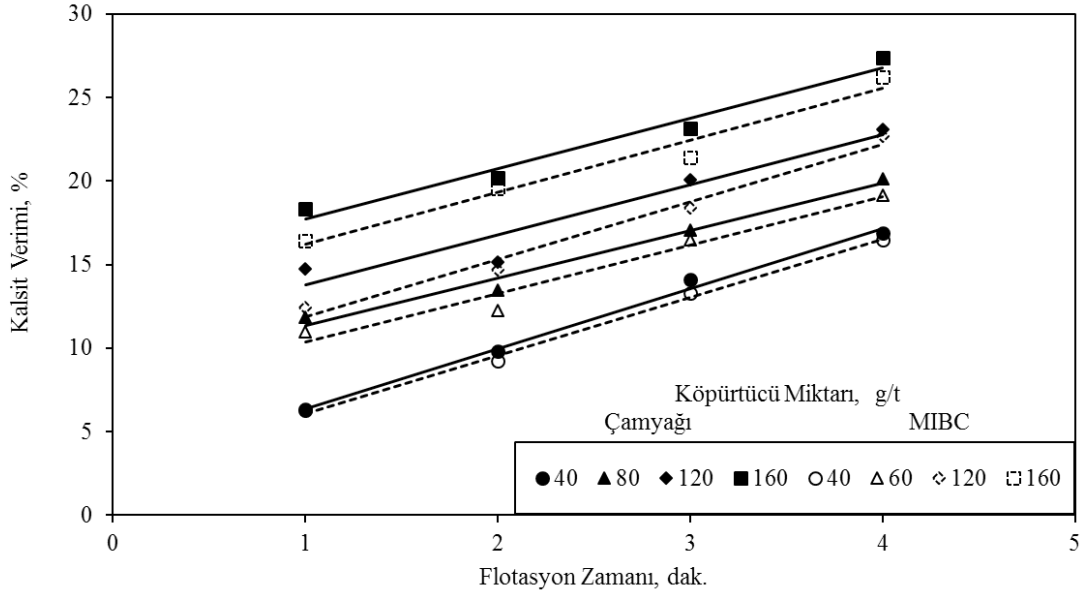
Köpürtücü Miktarı (g/t)	Flotasyon Zamanı (dak.)	Çam yağı					P_i	MIBC (Kursun 2014)					P_i
		Verim (%)			Tenör (%)			Verim (%)			Tenör (%)		
		Sölestit	Kalsit	Su	Sölestit	Kalsit		Sölestit	Kalsit	Su	Sölestit	Kalsit	
40	1	39.83	6.34	9.73	53.75	46.25	0.673	40.28	6.25	10.13	59.93	40.17	0.637
	2	41.28	9.79	14.70	59.21	40.79	0.701	43.76	9.21	14.56	60.12	39.88	0.664
	3	45.07	14.08	23.90	60.78	39.22	0.635	47.51	13.32	25.13	64.36	35.64	0.569
	4	46.15	16.90	30.25	61.84	38.16	0.612	51.57	16.47	32.21	65.11	34.89	0.559
80	1	51.86	11.82	24.01	62.28	37.72	0.524	63.74	10.95	23.68	72.83	27.17	0.489
	2	57.77	13.48	24.46	64.11	35.89	0.592	69.82	12.25	25.48	73.11	26.89	0.513
	3	63.28	17.04	34.13	72.20	27.80	0.547	73.98	16.48	35.12	78.01	21.99	0.516
	4	66.91	20.13	45.31	74.03	25.97	0.496	78.92	19.17	45.13	81.58	18.42	0.471
120	1	52.12	14.75	24.51	64.94	35.06	0.651	61.63	12.44	24.78	75.47	24.53	0.536
	2	54.01	15.15	25.59	70.07	29.93	0.642	63.20	14.69	27.11	74.18	25.82	0.586
	3	57.21	20.07	34.57	72.22	27.78	0.648	64.11	18.41	36.52	76.41	23.59	0.557
	4	63.49	23.11	45.97	72.99	27.01	0.625	70.31	22.68	48.61	76.55	23.45	0.529
160	1	60.73	18.34	29.07	58.44	41.56	0.697	65.98	16.42	27.78	67.74	32.26	0.646
	2	64.88	20.18	31.70	59.73	40.27	0.711	71.34	19.57	31.61	67.41	32.59	0.689
	3	64.55	23.14	38.59	58.12	41.88	0.682	74.17	21.41	37.52	66.71	33.29	0.642
	4	60.99	27.39	47.49	57.96	42.04	0.674	63.57	26.21	49.83	69.48	30.52	0.635

Toplayıcı konsantrasyonu: 600 g/t Na-Oleat, Katı Oranı: % 20, Karıştırma Hızı: 1200 dev/dak.

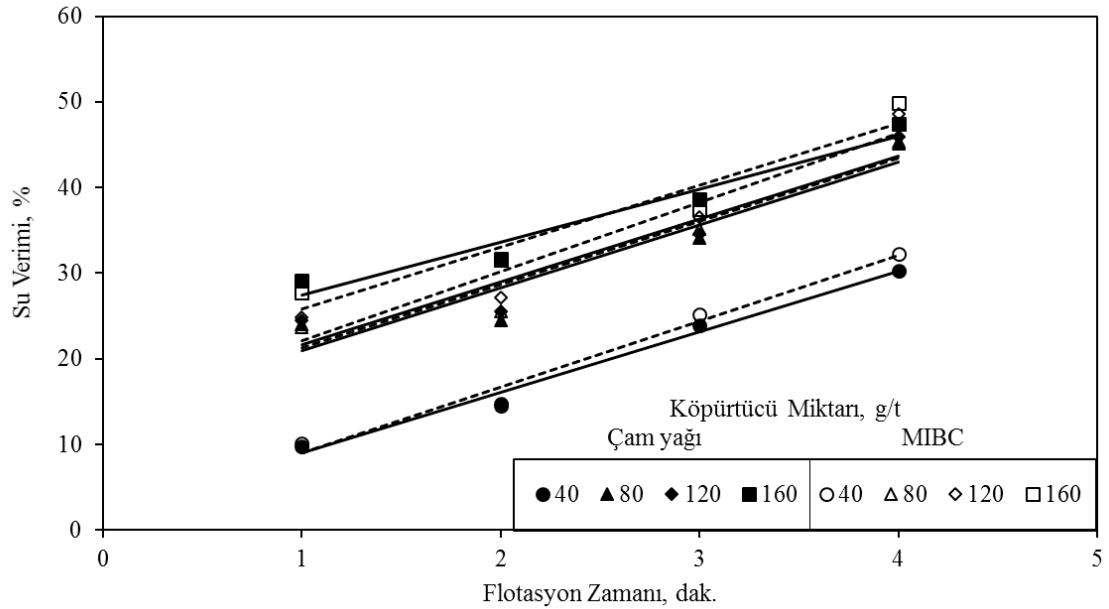
konsantrede 80 g/t MIBC kullanılması ile yüksek verim ve seçimlilik değerine ulaşılmış ve en düşük su ile taşıyım faktörü elde edilmiştir. Şekil 2 ve 3'te Çam yağı ve MIBC kullanılması durumunda flotasyon zamanına bağlı olarak mekanik flotasyon hücresinde kalsit ve su verimi grafikleri gösterilmektedir. Çam yağı kullanılması durumunda, konsantreye su ile taşınan kalsit miktarının daha fazla olduğu deneysel veriler sonucunda belirlenmiştir.

2.2. Kolon Flotasyonunda Köpürtücü Miktarı ve Türünün Su ile Taşınma Etkisi

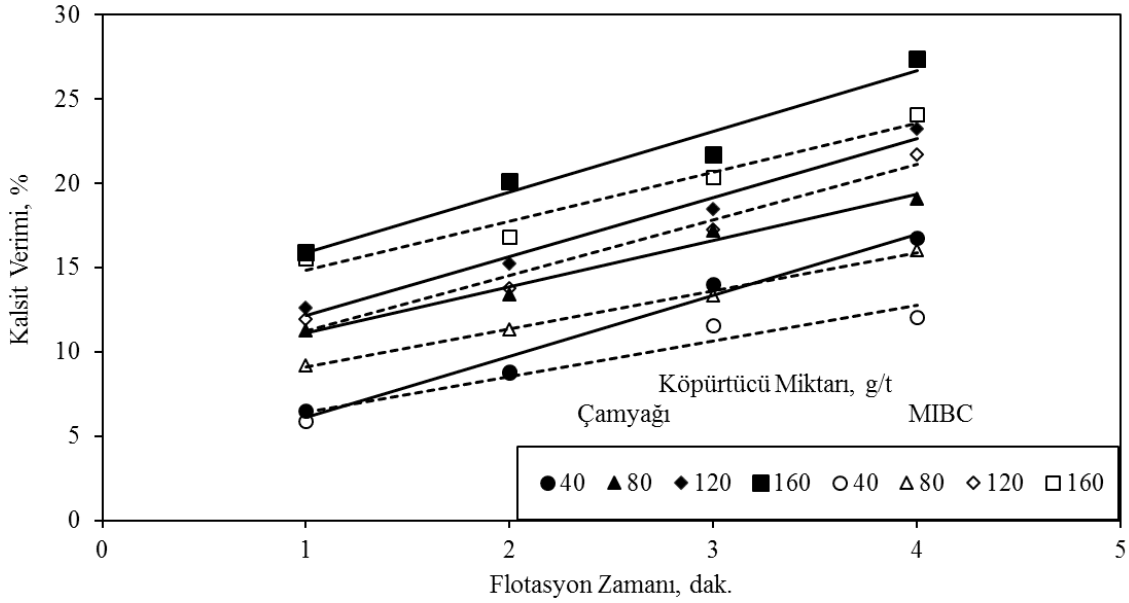
Kolon flotasyonunda, köpürtücü miktarına ve türüne bağlı olarak, su ve kalsit kazanımı ile su ile sürüklenme faktörüne etkileri Çizelge 3, Şekil 4 ve 5'te verilmiştir. %20 katı oranı, 4 dakika kalma süresi ve toplayıcı olarak 600g/t Na-Oleat, yüzeyel hava hızı 1 cm/sn, besleme hızı 400 ml/dak., yıkama suyu hızı 150 ml/dak. deneysel koşullarında çalışılmıştır.



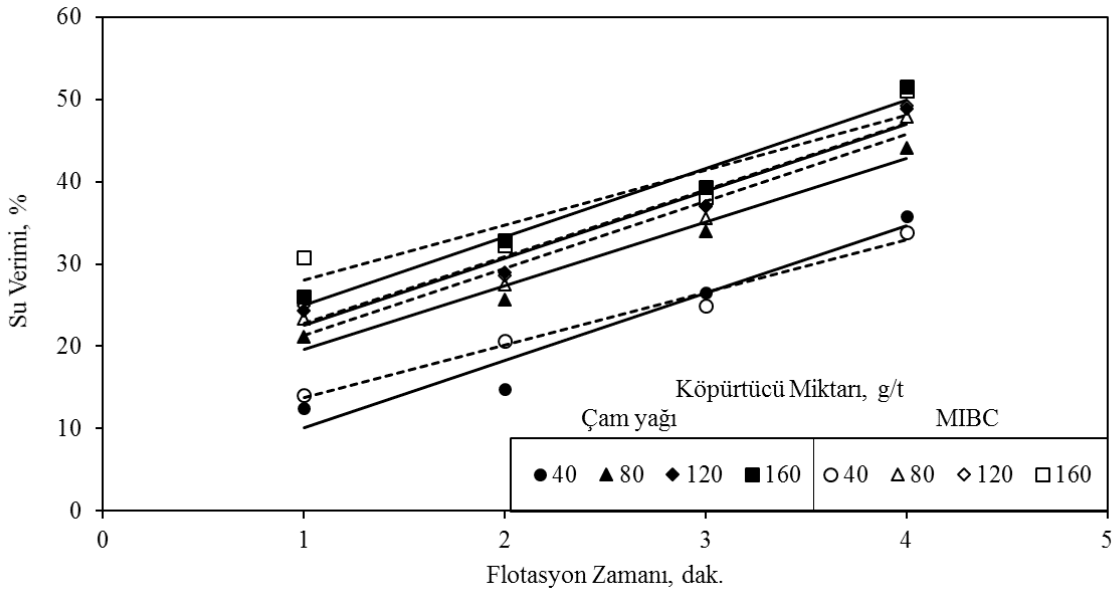
Şekil 2. Mekanik flotasyon hücresinde flotasyon zamanına bağlı olarak farklı konsantrasyonlarda Çam yağı ve MIBC kullanılması sonucu kalsit verimindeki değişim



Şekil 3. Mekanik flotasyon hücresinde flotasyon zamanına bağlı olarak farklı konsantrasyonlarda Çam yağı ve MIBC kullanılması sonucu su verimindeki değişim



Şekil 4. Kolon flotasyonunda flotasyon zamanına bağlı olarak farklı konsantrasyonlarda Çam yağı kullanılması sonucu kalsit verimindeki değişim (Kursun, 2017)



Şekil 5. Kolon flotasyonunda flotasyon zamanına bağlı olarak farklı konsantrasyonlarda Çam yağı kullanılması sonucu su verimindeki değişim (Kursun, 2017)

Şekil 4 ve 5'ten görüldüğü gibi kolon flotasyonunda kalsit ve su verimi tanelerin flotasyonda kalma zamanına bağlı olarak artmaktadır. Artan köpürtücü konsantrasyonlarında da yine su ve kalsit kazanımının arttığı görülmüştür. 80 g/t Çam yağı kullanıldığında 4. dakika flotasyon zamanında sölestit kazanımı %77,92, tenör değeri ise %82,05 olmaktadır. Aynı koşullarda, MIBC kullanılması durumunda ise en yüksek sölestit verim (%87,11) ve tenör (% 89,95) değerlerine ulaşılmıştır. Su ile taşıma faktörü 80 g/t MIBC

konsantrasyonunda konsantrede en düşük kalsit kirlenmesini sağlamış, böylece, P_i : 0,365 olarak Kirjevainen Modeli'ne göre hesaplanmıştır.

2.3. Mekanik ve Kolon Flotasyonunda Köpürtücü Miktarı ve Türünün Su ile Taşıma Etkisinin Karşılaştırılması

Optimize edilen 80 g/t Çam yağı ve MIBC miktarlarında konsantrede kazanılan sölestit verim ve tenör değerlerinin mekanik ve kolon flotasyonunda

yon hücrelerinde karşılaştırılması Şekil 6'da görülmektedir. Kolon flotasyonunda ve 80 g/t MIBC kullanılması ile maksimum sölestit verim ve seçimlilik değerlerine ulaşılmıştır.

Şekil 7'de, 80 g/t MIBC kullanılması durumunda kolon flotasyonunda konsantreye su ile taşınan kalsit miktarının daha az olduğu (P_i : 0,365) ve aynı zamanda daha yüksek verim (%87,11) ve seçimlilikte (%89,95) sölestit konsantrasi değerlerine ulaşıldığı görülmektedir.

Şekil 6 ve 7 birlikte yorumlandığında kolon flotasyonu ve MIBC kullanılması durumunda daha yüksek verim ve seçimlilik sağlanmış, en düşük su ile sürüklenme faktörü elde edilmiştir.

Bu çalışma, Kursun (2017)' de yapmış olduğu çalışmasının devamında yapılan bir araştırmadır. Kursun (2017)'de, ikili faz sisteminde (hava/su) kabarcık çaplarını Çam yağı ve MIBC için belirlemiş ve kolonda 1 cm/sn hava hızında 80 g/t MIBC kullanıldığında Çam yağına göre daha küçük çaplı kabarcık oluşumu sağlandığını, daha kararlı bir köpük oluşumu elde edilebildiğini belirtmiştir. Köpürtücü miktarı ve türü kabarcık boyutunu doğrudan değiştireceğinden su ile taşınım üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Verimin maksimum ol-

duğu bir köpürtücü derişimi kabul edilmekte ve genellikle kabarcık çapı ile köpürtücü konsantrasyonu arasında ters bir ilişkinin olduğu görülmektedir (Tuteja vd.,1995, Goodall ve O'Connor, 1992).

Kolon hücrelerinin fiziksel avantajlarının yanısıra; özellikle gövde yapısının uzun olması patlayan kabarcıklardan ayrılan tanelerin bir sonraki köpüğe tutunma olasılığının yüksek olmasını sağlamaktadır. Karıştırma ünitesinin olmayışı, yıkama suyunun kolonun üst kısmından verilmesi, hava kabarcıklarının hava üreteçleri yardımıyla sağlanması ve kabarcık çapının kontrol edilebilirliği, köpük derinliğinin yüksek olması köpük bölgesinde su akışının azalması ve hava tutunumunun fazla olmasını sağlamaktadır. Tane-kabarcık kopması köpük-pülp ara yüzeyinde gerçekleştiğinden taneler kolona yeni beslenmiş taneler ile aynı kalma süresine sahip olmaları sebebiyle su ile taşınımı azaltıcı üstünlükler ortaya koymaktadır.

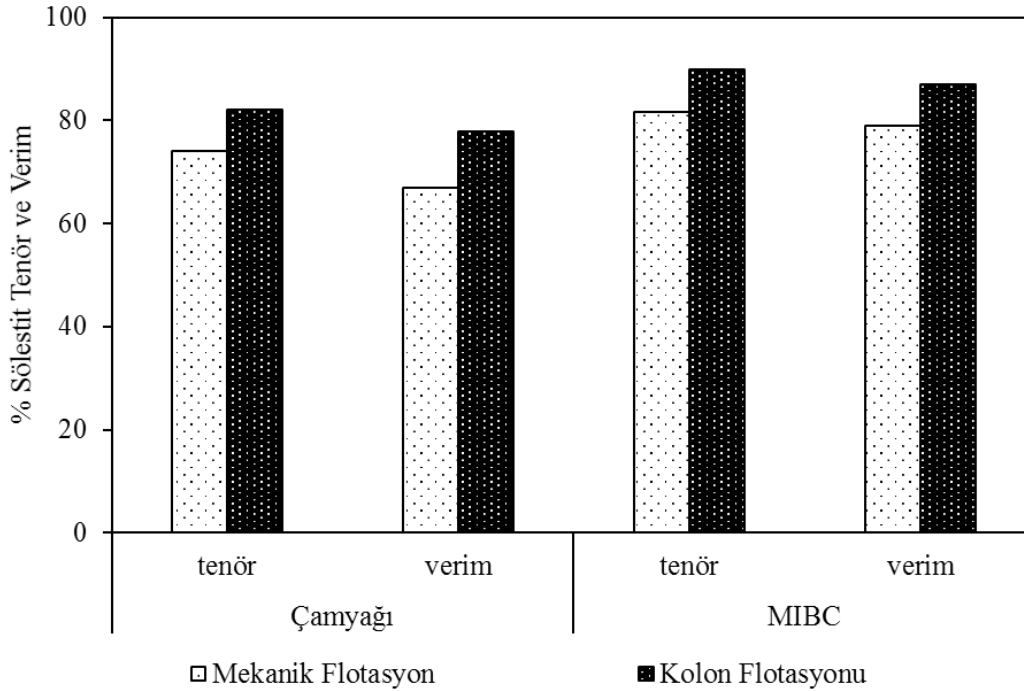
SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mekanik ve Kolon flotasyonunda yüksek saflıkta sölestit-kalsit (1:1) karışımı ile farklı köpürtücü türü ve miktarlarında kalsit, su, sölestit verimleri ve kalsit tanelerinin su ile sürüklenme faktörü

Çizelge 3. Flotasyon kolonunda flotasyon zamanına bağlı olarak farklı miktarlardaki Çam yağı ve MIBC'nin sölestit-kalsit-su verimi ve su ile taşınım faktörüne etkisi (sölestit [-106+38 µm], kalsit [-38µm])

Köpürtücü Miktarı(g/t)	Kalma Zamanı(dak.)	Çam yağı (Kursun 2017)						MIBC (Kursun 2014)						
		Verim (%)			Tenör (%)			P_i	Verim (%)			Tenör (%)		
		Sölestit	Kalsit	Su	Sölestit	Kalsit	Sölestit		Kalsit	Su	Sölestit	Kalsit		
40	1	39.74	6.51	12.44	58.63	41.37	0.541	51.41	5.91	14.02	71.52	28.48	0.434	
	2	42.11	8.84	14.83	61.24	38.76	0.624	54.80	8.78	20.63	73.24	26.76	0.445	
	3	48.96	14.04	26.49	63.52	36.48	0.571	57.63	11.55	24.92	78.55	21.45	0.493	
	4	52.21	16.79	35.76	66.11	33.89	0.514	67.36	12.07	33.81	76.82	23.18	0.380	
80	1	62.41	11.25	21.13	71.88	28.12	0.492	75.52	9.21	23.41	81.41	18.59	0.413	
	2	70.24	13.41	25.67	75.21	24.79	0.561	77.28	11.32	27.48	83.34	16.66	0.437	
	3	74.11	17.20	33.96	79.12	20.88	0.519	83.48	13.33	35.51	83.25	16.75	0.403	
	4	77.92	19.09	44.13	82.05	17.95	0.480	87.11	16.06	47.89	89.95	10.05	0.365	
120	1	62.64	12.61	24.37	74.81	25.19	0.553	71.51	11.92	24.97	84.31	15.69	0.484	
	2	64.73	15.26	28.95	75.24	24.76	0.572	72.93	13.78	28.63	81.12	18.88	0.518	
	3	66.21	18.49	37.01	77.02	22.98	0.564	74.18	17.23	36.97	80.21	19.79	0.511	
	4	70.38	23.23	48.86	78.20	21.80	0.541	78.82	21.74	49.21	84.51	15.49	0.498	
160	1	66.44	15.94	26.02	65.74	34.26	0.694	73.04	15.52	30.81	79.61	20.39	0.547	
	2	72.24	20.11	32.82	63.12	36.88	0.684	75.67	16.83	32.24	78.55	21.45	0.571	
	3	72.09	21.74	39.32	62.83	37.17	0.678	76.41	20.37	38.11	79.14	20.86	0.598	
	4	65.13	27.37	51.50	66.76	37.84	0.621	73.26	24.08	51.11	76.59	24.41	0.539	

Toplayıcı konsantrasyonu: 600 g/t Na-Oleat, Katı Oranı: % 20, Besleme Hızı: 400 ml/ dak., Yıkama Suyu Hızı: 150 ml/dak., Hava Hızı: 1 cm/sn,

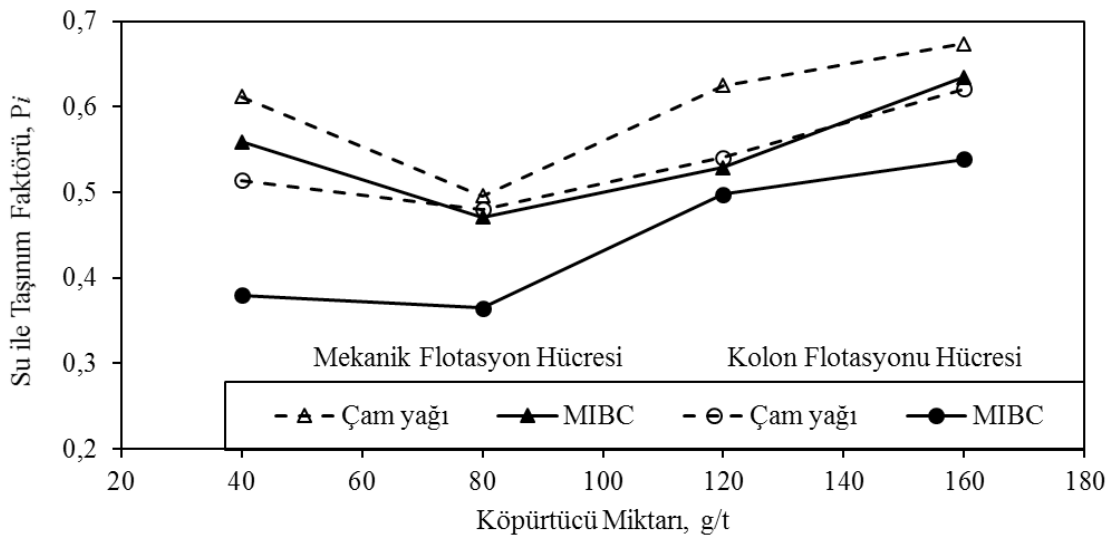


Şekil 6. Mekanik ve kolon flotasyonunda köpürtücü olarak Çam yağı ve MIBC kullanılması sonucu sölestit verim ve tenör değişimi

(Kirjavainen, 1988;1989) hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşmak mümkün olabilmektedir.

Köpürtücü türü ve miktarı her iki flotasyon sisteminde de önemli bir parametre olarak belirlenmiştir. Sölestit-kalsit karışımı ile yapılan deneylerde köpürtücü türü ve miktarlarındaki değişimin hidrofilik mineral ve su kazanımı üzerine etkisinin oldukça fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca, su ile

sürüklenme faktörü değişen köpürtücü konsantrasyonlarında önemli değişim göstermiş, neticede mekanik ve kolon flotasyonu kıyaslandığında kolon flotasyonunda su ile taşınan ince kalsit tanelerinin daha az olduğu görülmüştür. Kolon flotasyonu ile zenginleştirmede 80 g/t MIBC konsantrasyonlarında yüksek sölestit verim ve seçimliliğe ulaşılmıştır. Kirjavainen Modeli ile hesaplanan su ile sürüklenme faktörü (P_i) kolon flotasyonunda en düşük değere ulaşmıştır.



Şekil 7. Mekanik ve kolon flotasyonunda farklı miktarlarda ki Çam yağı ve MIBC köpürtücülerinin su ile taşınma faktörüne etkisi

Mekanik Flotasyon; $Pi_{MIBC} (0,471) < Pi_{Çam\ yağı} (0,495)$ Kolon Flotasyonu; $Pi_{MIBC} (0,365) < Pi_{Çam\ yağı} (0,480)$

Kolon flotasyonunda hava hızı, kabarcık çapı ve hava tutunumu, köpürtücü türü ve miktarının doğrudan etkilediği parametrelerdendir. Bu nedendir ki, ikili (su+hava) ve üçlü (su+hava+mineral) faz sistemlerinde hava hızına bağlı olarak hidrofil ve hidrofob minerallerin su ile taşınımının verim ve seçimlilik üzerine etkilerinin daha detaylı çalışılması gerektiği düşünülmektedir.

Kolonların mekanik flotasyon makinalarına kıyasla ortaya koymuş oldukları üstünlükler düşünüldüğünde, yıkama suyu sistemleri, hücre geometrisi, köpük yıkama sistemleri gibi özellikle de son yıllarda önem kazanan mekanik-ultrasonik titreşimlerin hidrofilik tanelerin su ile taşınımı azaltıcı etkiye sahip olduğu bilindiğinden daha geniş çapta yapılacak olan çalışmaların tenör ve seçimlilik açısından fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Akdemir, Ü., Güler, T., Yıldıztekin, G., 2005. Flotation and Entrainment Behavior of Minerals in Talc-Calcite Separation. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 34, 241-244.
- Antunes Pita, F., 2015. True Flotation Entrainment of Kaolinitic Ore in Batch Tests. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 36 (4), 213-222.
- Finch, J. A., Dobby, G. S., 1990. *Column Flotation*. Pergamon Press, Oxford (UK), USA, s.1180.
- Gaudin, A. M. Groh, J. O., Henderson, H. B. 1931. Effect of Particle Size on Flotation. *A. Tech. Publ.*, 414, 3-23.
- Goodall, C. M., O'Connor, C. T., 1992. Residence Time Distribution Studies in a Flotation Column, Part 1- The Relationship Between Solids Residence Time Distribution and Metallurgical Performance. *Int. J. Miner. Process.*, 36, 219-228.
- Gülsoy, Ö. Y., Ersayın, S., Siyahhan, S., 1995. Flotasyonda Su Kazanımı-Katı Kazanımı İlişkisinin İncelenmesi İçin Yeni Bir Yaklaşım. *Türkiye 14. Madencilik Kongresi*, ISBN 975-395-150-7.
- Gülsoy, Ö. Y., 1999. An Evaluation of the Entrainment Modelling Approaches in Flotation. *Madencilik Dergisi*, 38, No.1, March, 13-30.
- Gülsoy, Ö. Y., 2005. A Simple Model for the Calculation of Entrainment in Flotation. *Kor. J. Chem*, 22 (4): 628-634.
- Hoşten, Ç., Tezcan, A., 1990. The Influence of Frother Type on the Flotation Kinetics of a Massive Copper

Sulphide Ore. *Minerals Eng., Technical Note*, 3, (6), 637-640.

Hu, W., Liu, G., 1988. Design and Operating Experiences with Flotation Columns in China. *Column Flotation'88*, K.V.S. Sastry, (Ed.) Chapter 6, AIME, NY. 35-42.

Johnson, N. W., MC Kee, D. J., Lynch, A. J., 1974. Flotation Rates of Non-Sulphide Minerals in Chalcopyrite Processes. *Trans. Am. Ins. Min. Metall. Pet. Eng.*, 256, 204-226.

Jowett, A., 1966. Gangue Mineral Contamination of Froth. *Br. Chem. Eng.*, 2, (5), 330-333.

Kirjavainen, V. M., Laapas, H. R., 1988. A Study of Entrainment Mechanism in Flotation. XVI International Mineral Processing Congress, Stockholm, Sweden, June 5-10, Part B. Forssberg K.S.E. ed. (Amsterdam, etc: Elsevier, 665-677.

Kirjavainen, V. M., 1989. Application of a Probability Model for the Entrainment of Hydrophilic Particles in Froth Flotation. *Int. J. Miner. Process.*, 27, 63-74.

Kirjavainen, V. M., 1992. Mathematical Model for the Entrainment Hydrophilic Particles in Froth Flotation. *Int. J. Miner. Process.*, 35, 1-11.

Kirjavainen, V. M., 1996. Review and Analysis of Factors Controlling the Mechanical Flotation of Gangue Minerals. *Int. J. Miner. Process.*, 46 (1-2): 21-34.

Konopacka, Z., Drzymala J., 2010. Types of Particles Recovery-Water Recovery Entrainment Plots Useful in Flotation Research. *Adsorption*, 16: 313-320.

Kurşun, H., 2014. Effect of Fine Particles' Entrainment on Conventional and Column Flotation. *Particulate Science and Technology*, 32 (3) 251-256.

Kurşun, H., 2017. The Influence of Frother Types and Concentrations on Fine Particles Entrainment Using Column Flotation. *Separation Science and Technology*, 52 (4), 722-731.

Malysa, K., 1993. Water Contents is Froths Obtained from Solutions of Terpeneol and n-octanol. *Int. J. Miner. Process.*, 40, 69-81.

Reddy, P. S. R., Kumar, S. G.; Bhattacharyya, K. K., Sastri, S. R. S., Narasimhan, K. S., 1988. Flotation Column for Fine Coal Beneficiation. *Int. J. Miner. Process.*, 24, 161-172.

Rahal, K., Manlapig E., Franzidis, J-P., 2001. Effect of Frother Type and Concentration on the Water Recovery and Entrainment Recovery Relationship. *Minerals& Metallurgical Processing*, 18, 3, 138-141.

Ross, V. E., 1990. Flotation and Entrainment of Particles During Batch Flotation. *Minerals Eng.*, 3, 3/4, 254-256.

Ross, V. E., 1991. Comparison of Methods for Evaluation of True Flotation and Entrainment. *Trans.*

IMM. September, 100:C 121-C 126.

Savassi, O. N., Alexander, J. P., Franzidis, J-P., Manlapig, E. V., 1998. An Empirical Model for Entrainment in Industrial Flotation Plants. *Minerals Engineering*, 11(3): 243-256.

Subrahmanyam, T. V., Forsberg, E., 1988. Froth Stability Particle Entrainment and Drainage in Flotation. A Review. *Int. J. Min. Process.*, 23, 33-53.

Tuteja, R. K., Spottiswood, D. J., Misra, V. N., 1995. Recent Progress in the Understanding of Column Flotation-A Review. *The AusIMM Proceedings*, No.2, 25-31.

Yianatos, J. B., Contreras, F., Díaz, F., Villanueva, A., 2009. Direct Measurement of Entrainment in Large Flotation Cells. *Powder Technology*, 189: 42-47.

Yianatos, J., Contreras F., 2010. Particle Entrainment Model for Industrial Cells. *Powder Technology*, 197: 260–267.

Wark, I. W., 1981. The Entrainment Difficulty in Flotation Experiments. *Colloids Surface*, 2,193-194.

Warren, L. J., 1985. Determination of the Contributions of True Flotation and Entrainment in Batch Flotation Test. *Int. J. Min. Process.*, 14, 33-34.

Zheng, X., Franzidis, J-P., Johnson, N. W., Manlapig, E. V., 2005a. Modelling of Entrainment in Industrial Flotation Cells: The Effect of Solids Suspension. *Minerals Engineering*, 18: 51–58.

Zheng, X., Franzidis, J. P., Johnson, N. W., 2005b. An Evaluation of Different Models of Water Recovery in Flotation. *Minerals Engineering*, 19: 871–882.

Zheng, X., Johnson, N. W, Franzidis, J. P. 2006. Modelling of Entrainment in Industrial Flotation Cells: Water Recovery and Degree of Entrainment. *Minerals Engineering*, 19, 1191-1203.