

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI YAPIDAKİ NON-İYONİK SÜRFAKTANLARIN BİTÜMLÜ KÖMÜR
ŞLAMI ÜZERİNDE FLOTASYON VE GANG TAŞIMA DAVRANIŞLARI İLE
FİLTRASYON PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zeynep YEŞİLYURT

Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı

Cevher Hazırlama Mühendisliği Programı

OCAK 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI YAPIDAKİ NON-İYONİK SÜRFAKTANLARIN BİTÜMLÜ KÖMÜR
ŞLAMI ÜZERİNDE FLOTASYON VE GANG TAŞIMA DAVRANIŞLARI İLE
FİLTASYON PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Zeynep YEŞİLYURT
(505111109)**

Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı

Cevher Hazırlama Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Feridun BOYLU

OCAK 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 505111109 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Zeynep YEŞİLYURT**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“FARKLI YAPIDAKİ NON-İYONİK SÜRFAKTANLARIN BİTÜMLÜ KÖMÜR ŞLAMI ÜZERİNDE FLOTASYON VE GANG TAŞIMA DAVRANIŞLARI İLE FİLTRASYON PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Feridun BOYLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Gülay BULUT**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Orhan ÖZDEMİR
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : **16 Aralık 2013**
Savunma Tarihi : **20 Ocak 2014**

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu araştırmanın başlangıcından, tamamlanması aşamasına kadar, çalışmanın yönlendirilmesi ve sonuçların değerlendirilmesinde katkılarından dolayı danışmanım Sayın Doç. Dr. Feridun BOYLU'ya ve bu çalışmayı yapmama olanak sağlayan, bir yandan da yepyeni bir kapı aralamamı sağlayan Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Gündüz ATEŞOK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam boyunca, değerli fikirleri ile katkıda bulunan Prof. Dr. Mehmet Sabri Çelik, Behzad Vaziri Hassas ve araştırma görevlisi Onur Güven'e, arkadaşlarım Ceren Ergüneş ve Ezgi Burcu Erdoğan'a teşekkür ederim. Varlıklarıyla her türlü zorluğu hafifleten araştırma görevlisi arkadaşlarım Ünzile Yenial, Hüseyin Baştürkücü ve Beste Aydın'a teşekkür ederim. Her türlü destekleri için ailem Hüseyin, Emine ve Duygu Yeşilyurt ile Baransel TARSUS'a teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2013

Zeynep Yeşilyurt
(Cevher Hazırlama Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Kömür Flotasyonu.....	3
2.1.1 Giriş.....	3
2.1.2 Kömürün yüzey özellikleri.....	5
2.1.2.1 Temas açısı- Islanabilirlik.....	5
2.1.2.2 Elektriksel çift tabaka.....	7
2.1.3 Flotasyon reaktifleri	9
2.1.3.1 Yağlı kollektörler	10
2.1.3.3 Köpürtücüler	14
2.1.4 Flotasyon teknolojisi	15
2.2 Flotasyonda Gang Taşınımı	16
2.2.1 Agregasyon sonucu hapsolma.....	17
2.2.2 Mekanik taşınma	17
2.3 Kömürün Susuzlandırılması	21
2.3.1 Endüstriyel susuzlandırma	21
2.3.2 Filtrasyon reaktifleri.....	23
2.3.3 Filtrasyon teorisi	24
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	27
3.1 Malzeme ve Yöntem	27
3.1.1 Kömür numunesinin elek analizi ve değerlendirmesi.....	27
3.1.2 Deneylerde kullanılan reaktifler.....	29
3.1.3 Deneylerde kullanılan ekipmanlar ve yöntem	31
3.1.3.1 Flotasyon deneyleri ve gang taşıma karakteristiklerinin belirlenmesi.....	31
3.1.3.2 Flotasyon performansının değerlendirilmesi.....	33
3.1.3.3 Susuzlandırma karakteristiklerinin belirlenmesi.....	34
3.2 Deney Sonuçları	35
3.2.1 Farklı yapıdaki non-iyonik sürfaktanların flotasyon performansları	35
3.2.1.1 Optimum kollektör miktarının belirlenmesi.....	35
3.2.2 Optimum köpürtücü miktarının belirlenmesi.....	37
3.2.2.1 Sadece MIBC kullanılarak gerçekleştirilen flotasyon deneyleri.....	37
3.2.2.2 Kollektör varlığında optimum köpürtücü miktarının belirlenmesi	38
3.2.3 Yağlı kollektörlerin (Motorin ve Kerosen) flotasyon performansı.....	50
3.2.4 Non-iyonik sürfaktanların gang taşıma karakteristikleri	53

3.2.5 Farklı yapıdaki non-iyonik sürfaktanların filtrasyon karakteristikleri	60
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR.....	69
EKLER.....	75
ÖZGEÇMİŞ	83

KISALTMALAR

YV	: Yanabilir Verim
KUV	: Kül Uzaklaştırma Verimi
AE	: Ayırma Etkinliği
MIBC	: Metil İzobütil Karbinol
HLB	: Hydrophile-Lipophile Balance
CMC	: Critical Micelle Concentration
ppm	: Parts per million
CCC	: Critical Coalescence Concentration
DFI	: Dynamic Foamability Index
cSt	: Centistokes
ASTM	: American Society for Testing and Materials
R_w	: Water Recovery
R_a	: Gangue Recovery
EF	: Entrainment Factor
PKO	: Pülpte Katı Oranı
ENT	: Mekanik Taşınma Derecesi
ENT₀kül	: Agregasyon Derecesi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Çeşitli kesme boyutlarında elde edilen ürünlerin ayırma etkinlikleri ..	29
Çizelge 3.2 : Deneylerde kullanılan noniyonik sürfaktanların kimyasal özellikleri.	30
Çizelge 3.3 : Reaktif cinsine göre değişen agregatlar arası hapsolme yüzdesi ve mekanik taşınma derecesi.....	60
Çizelge 3.4 : %17 küllü lave kazanımı için filtrasyon işlemi öncesi uygulanması gereken flotasyon deney şartları ve elde edilen pülpteki katı oranı ve kül içeriği.....	61
Çizelge 4.1 : Tüm kollektörlerin flotasyon performansı, gang taşıma karakteristiği ve susuzlandırma performansının toplu gösterimi	68
Çizelge A.1 : 50 g/t X-15 sürfaktarıyla yapılan deney sonuçları.....	76
Çizelge A.2 : 50 g/t X-45 sürfaktarıyla yapılan deney sonuçları.....	77
Çizelge A.3 : 50 g/t X-114 sürfaktarıyla yapılan deney sonuçları.....	77
Çizelge A.4 : 50 g/t X-102 sürfaktarıyla yapılan deney sonuçları.....	78
Çizelge A.5 : 50 g/t X-100 sürfaktarıyla yapılan deney sonuçları.....	78
Çizelge A.6 : 50 g/t X-165 sürfaktarıyla yapılan deney sonuçları.....	79
Çizelge A.7 : 50 g/t X-305 sürfaktarıyla yapılan deney sonuçları.....	78
Çizelge A.8 : 50 g/t X-705 sürfaktarıyla yapılan deney sonuçları.....	80
Çizelge A.9 : Yalnızca köpürtücü MIBC ile yapılan deney sonuçları	80
Çizelge A.10 : 75 g/t motorin ile yapılan deney sonuçları	81
Çizelge A.11 : 75 g/t kerosen ile yapılan deney sonuçları	81

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Kömürün heterojen yapısı (Laskowski, 2001).	3
Şekil 2.2 : Sulu ortamda hava kabarcığı ve mineral arasındaki temas açısı (Laskowski, 2001).	6
Şekil 2.3 : Kömürleşme derecesine göre değişen temas açısı.	7
Şekil 2.4 : Kömürleşme derecesine göre sıfır yük noktasının değişimi.	7
Şekil 2.5 : Yağlı kollektörün ve noniyonik sürfaktanın kömür yüzeyine adsorpsiyon mekanizması (Xia vd., 2013).	9
Şekil 2.6 : Nonpolar ve polar yağlı reaktiflerin yüzeye yayılması (Jia vd., 2002)	10
Şekil 2.7 : Sürfaktanların düşük adsorpsiyon yoğunluğundaki davranışları	11
Şekil 2.8 : Maksimum adsorpsiyon yoğunluğunda non-iyonik sürfaktanın a) linyit yüzeyine b) alt bitümlü kömür yüzeyine c) bitümlü kömür yüzeyine adsorpsiyonu (Crawford ve Mainwaring, 2001).	13
Şekil 2.9 : Flotasyonda kazanım (gerçek flotasyon R_F + mekanik taşınma R_E) a) flotasyon köpük zonu b) kabarcıklar arası zon (Shubert, 1999).	18
Şekil 2.10 : Kabarcıklar arasındaki gang taşınımının gerçekleştiği sıvı filmler, Plateau sınırı ve verteks.	18
Şekil 2.11 : Flotasyonda köpürtücü miktarının kabarcık boyuna etkisi (Melo ve Laskowski, 2007)	20
Şekil 2.12 : Filtrasyon basıncına bağlı olarak değişen kek nemi.	22
Şekil 3.1 : Deneylerde kullanılan taşkömürü numunesinin elek altı eğrisi	28
Şekil 3.2 : Deneylerde kullanılan kömür numunesinin herbir boyut aralığındaki kül içerikleri	28
Şekil 3.3 : Triton X tipi noniyonik sürfaktanların (oktilfenol etoksilat) kimyasal formülü.	31
Şekil 3.4 : Deneylerde kullanılan laboratuvar tipi Denver flotasyon makinesi.	32
Şekil 3.5 : Warren metoduyla mekanik gang taşınma miktarının belirlenmesi (George vd., 2004)	33
Şekil 3.6 : Büchner vakum filtrasyon düzeneği.	34
Şekil 3.7 : a) Kollektör miktarına bağlı olarak değişen ayırma etkinlikleri b) kül uzaklaştırma verimine bağlı olarak değişen ayırma etkinlikleri.	36
Şekil 3.8 : 75 ve 100 g/t MIBC köpürtücüsü ile gerçekleştirilen flotasyon sonuçları a) kül içeriğine bağlı olarak değişen ayırma etkinliği b) kül içeriğine bağlı olarak değişen yanabilir verim.	38
Şekil 3.9 : Triton X-15 kollektörü ile gerçekleştirilen flotasyon sonuçları: a) ayırma etkinliği-kül ilişkisi b) yanabilir verim-kül ilişkisi	39
Şekil 3.10 : Triton X-45 kollektörü ile gerçekleştirilen flotasyon sonuçları: a) ayırma etkinliği-kül ilişkisi b) yanabilir verim-kül ilişkisi	40
Şekil 3.11 : Triton X-114 kollektörü ile gerçekleştirilen flotasyon sonuçları: a) ayırma etkinliği-kül ilişkisi b) yanabilir verim-kül ilişkisi	41
Şekil 3.12 : Triton X-100 kollektörü ile gerçekleştirilen flotasyon sonuçları: a) ayırma etkinliği-kül ilişkisi b) yanabilir verim-kül ilişkisi	42

Şekil 3.13 :	<i>Triton X-102</i> kollektörü ile gerçekleştirilen flotasyon sonuçları: a) ayırma etkinliği-kül ilişkisi b) yanabilir verim-kül ilişkisi	44
Şekil 3.14 :	<i>Triton X-165</i> kollektörü ile gerçekleştirilen flotasyon sonuçları: a) ayırma etkinliği-kül ilişkisi b) yanabilir verim-kül ilişkisi	45
Şekil 3.15 :	<i>Triton X-305</i> kollektörü ile gerçekleştirilen flotasyon sonuçları: a) ayırma etkinliği-kül ilişkisi b) yanabilir verim-kül ilişkisi	46
Şekil 3.16 :	<i>Triton X-705</i> kollektörü ile gerçekleştirilen flotasyon sonuçları: a) ayırma etkinliği-kül ilişkisi b) yanabilir verim-kül ilişkisi	47
Şekil 3.17 :	Kollektörlerin performansının karşılaştırılması	48
Şekil 3.18 :	Optimum noniyonik sürfaktan ve köpürtücü miktarlarındaki flotasyon performanslarının HLB değişimine göre karşılaştırılması (değerlendirmeler % 17 küllü lave alımı üzerinden yapılmıştır)	49
Şekil 3.19 :	Optimum yağlı kollektör miktarının belirlenmesi	51
Şekil 3.20 :	Yağlı kollektörlerde optimum köpürtücü miktarının belirlenmesi	51
Şekil 3.21 :	Yağlı kollektörlerin flotasyon performanslarının belirlenmesi	52
Şekil 3.22 :	Optimum şartlarda gerçekleştirilen yağlı kollektör flotasyon performanslarıyla optimum sürfaktan cinsi ve miktarında gerçekleştirilen flotasyon performanslarının yalnızca köpürtücü varlığındaki performansla karşılaştırılması	52
Şekil 3.23 :	a)Sadece MIBC varlığında (75 ve 100 g/t) oluşan mekanik taşınma b) Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi (Rw: su kazanımı, Ra: kül kazanımı)	54
Şekil 3.24 :	a)Optimum <i>Triton X-15</i> ve değişen köpürtücü miktarlarında oluşan mekanik taşınma b)Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi	54
Şekil 3.25 :	a)Optimum <i>Triton X-45</i> ve değişen köpürtücü miktarlarında oluşan mekanik taşınma b)Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi	55
Şekil 3.26 :	a)Optimum <i>Triton X-114</i> ve değişen köpürtücü miktarlarında oluşan mekanik taşınma b)Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi	55
Şekil 3.27 :	a)Optimum <i>Triton X-100</i> ve değişen köpürtücü miktarlarında oluşan mekanik taşınma b)Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi	56
Şekil 3.28 :	a)Optimum <i>Triton X-102</i> ve değişen köpürtücü miktarlarında oluşan mekanik taşınma b)Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi	56
Şekil 3.29 :	a)Optimum <i>Triton X-165</i> ve değişen köpürtücü miktarlarında oluşan mekanik taşınma b)Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi	57
Şeki 3.30 :	a)Optimum <i>Triton X-305</i> ve değişen köpürtücü miktarlarında oluşan mekanik taşınma b)Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi	57
Şekil 3.31:	a)Optimum <i>Triton X-705</i> ve değişen köpürtücü miktarlarında oluşan mekanik taşınma b)Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi	58
Şekil 3.32 :	a)Optimum Kerosen ve değişen köpürtücü miktarlarında oluşan mekanik taşınma b)Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi	58

Şekil 3.33 : a)Optimum Motorin ve değişen köpürtücü miktarlarında oluşan mekanik taşınma b)Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi	59
Şekil 3.34 : En uygun Kollektör ve Köpürtücü konsantrasyonları varlığında oluşan mekanik taşınma dereceleri.....	59
Şekil 3.35 : Filtrasyonda süreye bağlı olarak ölçülen filtrat hacmi	61
Şekil 3.36 : V'ye karşı t/V grafiği ve regresyon denklemleri.....	62
Şekil 4.1 : HLB sayısına göre flotasyon performansının, mekanik taşınma derecesinin ve filtrasyon performanslarının değerlendirilmesi.....	67

FARKLI YAPIDAKİ NON-İYONİK SÜRFAKTANLARIN BİTÜMLÜ KÖMÜR ŞLAMI ÜZERİNDE FLOTASYON VE GANG TAŞIMA DAVRANIŞLARI İLE FİLTASYON PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Kömür flotasyonunda konsantre kalitesinin büyük ölçüde ince boyutlu gang minerallerinin kabarcıklar arasında taşınmasına bağlı olduğu bilinmektedir. Gang taşınması konsantreye taşınan su miktarıyla, su miktarı da köpük karakteristiğiyle doğrudan ilişkilidir. Bunun yanında non-iyonik sürfaktanlar filtrasyon işleminde çok düşük kek nemlerine ulaşılmasında etkin yardımcı reaktiflerdir. Benzer reaktifler flotasyonda da kullanıldığından, flotasyon aşamasında kullanılan kimyasalların, ayırma ve susuzlandırma performanslarının birlikte değerlendirilmesi daha da önemli hale gelmektedir. Sürfaktanlar yapılarında hidrofil bir baş grubu ile hidrofob kuyruk bulundurulur. Sürfaktanın temel özelliklerini belirlemede hidrofob ve hidrofil kısımları arasındaki denge kritik bir faktördür. Bu hidrofil-lipofil dengesi, ya da HLB değeridir. Düşük HLB değerine sahip sürfaktanlar daha lipofil bir yapıya sahiptir. Bu değer aynı zamanda sürfaktanın etkin olduğu alanı belirler.

Bu çalışmada, Zonguldak bölgesine ait bitümlü şlam kömürünün flotasyon performansı ile beraber flotasyon sırasındaki gang taşıma davranışı araştırılmıştır. Flotasyon ürünleri daha sonra vakum filtrasyon işlemine tabi tutulmuş ve filtrasyon performansları değerlendirilmiştir. Çalışmada Hidrofil-Lipofil denge değeri 4.8'den 18,4'e kadar değişen Triton X-15, X-45, X-114, X-100, X-102, X-165, X-305 ve X-705 non-iyonik sürfaktanları ile konvansiyonel yağlı kollektörler olan motorin ve kerosenin flotasyon+filtrasyon karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Köpürtücü olarak MIBC (metil izobütil karbinol) kullanılmıştır.

Optimum kollektör ve köpürtücü miktarları belirlendikten sonra flotasyon deneyleri Denver flotasyon hücresinde, %15 pülpte katı oranında, 1200 devir/dakika karıştırıcı hızında gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında belirli periyotlarda toplanan konsantrenin su içerikleri hesaplanarak konsantreye taşınan gangın miktarı Warren metoduyla yorumlanmıştır. Deneyler maksimum ayırma etkinliğine ulaşmak için sürfaktan dozajının 50 g/t olması gerektiğini göstermiştir. Miktar arttıkça ayırma etkinliği düşmektedir. 50 g/t sürfaktanla birlikte 75-100 g/t MIBC optimum köpürtücü miktarıdır. Sürfaktanlar arasında en lipofilik olan X-15 %42 olan şlam külünü %15'e, %55 ayırma etkinliği ve %75 yanabilir verimle indirmiştir. Bununla birlikte yağlı kollektörler olan motorin ve kerosen kullanıldığında Triton-X tipi non-iyonik sürfaktanlardan daha yüksek ayırma etkinliklerine ulaşılmıştır. Ancak, geçmiş çalışmalarda öne sürülenden farklı olarak konsantreye taşınan su miktarı arttıkça flotasyon performansı artış göstermektedir. Tüm sürfaktanlarla elde edilen %17 küllü konsantreyle birlikte en çok su X-15 reaktifiyle taşınmıştır. Tüm sürfaktanlarla elde edilen %17 küllü ürünler eşit şartlarda filtrasyona tabi tutulduğunda en düşük spesifik kek direnci veren X-15 hem diğer sürfaktanlara hem de yağlı kollektörlere

üstün gelmiştir. Büchner hunisi kullanılarak yapılan filtrasyon deneylerinde yaklaşık %25 pülpte katı oranındaki flotasyon ürünleri ilave bir reaktif eklemekten beslenmiş ve zamana karşı filtrat hacmi ölçülmüştür. Darcy denkleminde türetilen parabolik filtrasyon eğrisi verileri kullanılarak kekin geçirgenliğinin ve kolay susuzlandırılabilir olmasının ölçütlerinden biri olan spesifik kek direnci hesaplanarak değerlendirilmiştir. Sürfaktanlarla inilen kek nemleri arasında büyük farklılık gözlenmemekle birlikte en düşük spesifik kek direnci X-15 için hesaplanmıştır.

Flotasyon ve susuzlandırma performansının birlikte değerlendirildiği çalışmaların sonucunda yağlı kollektörlerin flotasyon başarısına rağmen, düşük HLB değerine sahip, diğer bir deyişle en lipofilik non-iyonik sürfaktan en iyi performansı göstermiştir.

SEPARATION PERFORMANCE AND ENTRAINMENT CHARACTERISTICS OF NON-IONIC SURFACTANTS THROUGH BITUMINOUS COAL SLIME FLOTATION FOLLOWED BY FILTRATION

SUMMARY

More efficient mining techniques and ever higher tonnages tend to produce finer raw coal being fed to coal plants. Ultrafine coal is generally less than 150 microns, normally in the form of a slurry, which is usually disposed or that may be treatable by froth flotation. This fraction is also sometimes referred to as slimes. Fine coal is far more difficult to dewater than coarse coal, because the surface area of the particle is significantly larger. Treatment of this size fraction will be a must by economic and environmental reasons.

Coal flotation makes use of the natural hydrophobicity of the carbonaceous matter in coal. To enhance the hydrophobicity of the coal particles, oily collectors, such as diesel oil and kerosene are usually used. Promoters such as surfactants and water-soluble polymers are utilized to modify the coal surface and to improve emulsification of the oily collector. The structure of surfactants/ collector molecules, the type of bonding (physisorption or chemisorption) that forms with the coal surface are all important factors for imparting hydrophobicity on the coal surface. Molecular orientations of the reagent molecules also play an important role on the adsorption process. The attachment of surfactants to the coal surface can take place by three mechanisms: Hydrogen bonding of oxygen atoms in the polar part of the molecule with oxygenated surface sites on the coal, hydrophobic bonding of the aliphatic hydrocarbon chain with the hydrophobic sites on the coal surface and π -bonding of the aromatic ring on the hydrocarbon chain of the collector with aromatic sites on the coal surface.

It is suggested that particles are carried to the concentrate of flotation cells via three mechanisms: Selective attachment of particles on air bubbles (recovery of valuable hydrophobic particles by true flotation), entrainment in water which passes through the froth (valuable or gangue) near the pulp-froth interface, physical entrapment between coarse particle aggregates in the froth attached to air bubbles (often referred to as aggregation). The separation efficiency and selectivity of flotation are directly proportional to recoveries of the mineral species in the feed due to true flotation and entrainment in case there are no coarse particles in the system. Ultra-fine gangue minerals are entrained in the films between two bubbles, in the Plateau borders between three bubbles or in vertex points where three Plateau borders meet.

It is well known that hydrolic entrainment of ash forming minerals in fine coal flotation effects the quality of the product. Entrainment is proportional to water recovery this proportionality is referred to as the entrainment factor. The froth structure has a well known influence on the degree of entrainment. The froth structure is a complex function of many factors including frother and collector concentration, air flow, and the content of hydrophobic particles. A stable froth

composed of small bubbles allows greater recovery of both entrained and attached particles due to lower drainage and less coalescence.

The efficiency of the filtration process is strongly related to the properties of the filter cake structure. It is a very common practice to consider a filter cake as a bundle of capillary tubes. According to Laplace equation, for a capillary of radius r , the required pressure to decrease the liquid level goes down as the surface tension decreases, capillary radius increases and contact angle increases. The limited efficiency of the mechanical dewatering techniques in reducing the moisture content of the filter cakes is thus increased by the usage of chemicals as dewatering aids which lower the surface tension or increase the hydrophobicity.

This study aims the investigation on water recovery characteristics and related entrainment degrees through flotation of a hard bituminous coal slime from Zonguldak, Turkey. The coal was then subjected to filtration without any further reagent consumption and the filtration performance was evaluated. The coal was -0,2 mm hydrocyclone overflow which was normally thickened and filtrated. Solid content in the pulp of the original sample was 42% and original process water was used in the experiment. The ash content of the sample was 42,8% where 95% of the ash making minerals were clay minerals.

Sieve analysis results showed that d_{80} and d_{50} sizes are found to be 120 μm and 38 μm respectively. The sample was subjected to sieve test using

Non-ionic surfactants are widely used in filtration process to achieve lower cake moistures. Similar non-ionic surfactants are also used in flotation of coal effectively with or without conventional oily collectors. It is worth to emphasize the effect of these non-ionic surfactants in both flotation and filtration process. Besides, it is important to determine the entrainment characteristics during flotation process as the gangue minerals consists mainly of clay.

Surfactants generally consists of a hydrophilic head and a lipophilic tail. Variation of the size of these groups determines the area of use of the surfactant. The rate of the molecular weight of the hydrophilic part to the molecular weight of the lipophilic part gives the HLB (Hydrophilic-Lipophilic Balance). Lower HLB numbers stand for lipophilic surfactants (long tail or short head), higher HLB numbers stand for hydrophilic surfactants (short tail or long head). HLB numbers are calculated for nonionic surfactants, and these surfactants have numbers ranging from 0-20. HLB numbers >10 have an affinity for water (hydrophilic) and number <10 have an affinity of oil (lipophilic).

8 non-ionic surfactants of Triton-X series (Triton X-15, X-45, X-114, X-100, X-102, X-165, X-305 ve X-705 having HLB values of 4.9, 9.8, 12.4, 13.4, 14.4, 15.5, 17.3, 18.4 respectively) were used as collector and conventional oily collectors, kerosene and diesel oil were used for the purpose of comparison. The HLB numbers of the surfactants varied between 4,9 and 18,4. The lipophilic tail remains the same while the size of the hydrophilic head (called X-value) changes for the surfactants of Triton-X serie. MIBC (methyl isobutyl carbynol) was used as frother. A 200 g of coal sample was subjected to single stage direct flotation in a Denver laboratory flotation machine with 1,2 L cell making solids concentration of 15%. The pulp was conditioned for 3 min with the collector in question. Then, the pulp was aerated and the froth was collected at different time intervals (0.5 min, 1 min, 2 min, 3 min, 4 min). The pulp was weighed and dried separately. The dried sample was weighed and the quantity of water and solid transfer to the froth was calculated. The products

were then subjected to the ash analysis. Flotation performance was evaluated using combustible recovery and separation efficiency values.

The experiments pointed out that 50 g/t of any collectors and 75-100 g/t MIBC is required to reach the maximum separation efficiencies. Among the surfactants, Triton X-15 was found to be superior to others for high flotation or separation performance. That is, the ash contents were reduced down to the levels of 15% from approximately 42% with the combustible recovery of 75% and separation efficiency of 55%. However, oppositely to the past experiences on water recovery and entrainment phenomena, it was noted that the more water recovery, the higher flotation performance is; when compared to others, the water recoveries in froth for production of coal concentrates with 17% ash contents were found higher (50%) with Triton X-15 surfactant.

Gangue recovery during flotation is evaluated with entrainment and entrapment degrees. %ash-Rw graphic (%ash=ash content of concentrate%, Rw=water recovery) was drawn. The point where no water is recovered (intersection of the line) no entrainment occurs. At this point the ash value is only due to entrapment or consists of organic ash content in the coal. In this study the point where there is no entrainment is expressed as %ENT0ash. Entrapment degrees of nonionic surfactants was evaluated with the help of %ENT0ash values.

Ra-Rw graphics form a linear relationship (Ra=gangue recovery, Rw=water recovery) and the slope of the regression line gives the ENT (entrainment degree). ENT is higher for the surfactants having lowest and highest HLB values.

Büchner funnel apparatus was used for the dewatering process. Ash making minerals type and content of the concentrate is an important parameter effecting the dewatering performance of coal. Flotation experiments were carried out in conditions necessary to get concentrates of 17% ash for each surfactant type and to minimize the effect of ash content. The flotation concentrates were directly subjected to dewatering process without further reagent addition. Coal suspension was poured into a funnel of 100 mm diameter which was attached to the filtrate flask. The flask held a glass measure to record the filtrate volume as a function of time. A graphic representation of t/V as function of V gives a straight line where t is the filtration time and V is the filtrate volume. From the slope the cake resistance α can be calculated, while from the intercept the filter medium resistance R can be found. The specific cake resistance (α) and medium resistance (R) were calculated for each reagent in order to evaluate the ease of the dewatering.

The thesis aims to evaluate the flotation separation performance, entrainment and entrapment characteristics and filtration performance of 8 non-ionic surfactants of different HLB values as well as conventional oily reagents for comparison.

The results show that while the most lipophilic surfactant (Triton X-15) is superior to other non-ionic surfactants, it is not found superior to conventional oily collectors (diesel oil and kerosene). Flotation performance, entrainment-entrapment characteristics and filtration performance data are consistent with each other. It is also important to note that HLB values are not directly effecting flotation or dewatering performance and entrainment-entrapment degrees.

1. GİRİŞ

Artan mekanize madencilik yöntemleri sonucu, üretilen kömürlerin yaklaşık %20'si çok ince boyutta elde edilmektedir. Bu ince kömürlerin büyük çoğunluğu zenginleştirme ve susuzlandırmanın zorluğu ve ekonomik sebeplerle kullanıma girmeden atık barajlarına gönderilmektedir. Önümüzdeki yıllarda bu kömürlerin değerlendirilmesi artan talep, çevre sağlığı ve atık depolama problemleri sebebiyle gerekli olacaktır.

Kömürleşme derecesine göre yapılan ASTM sınıflandırmasına göre kömürler; antrasit, bitümlü kömür, yarı bitümlü kömür ve linyit olmak üzere 4 gruba ayrılırlar. Linyit, ısı değeri düşük, barındırdığı kül ve nem miktarı fazla olduğu için genellikle termik santrallerde yakıt olarak kullanılan bir kömür çeşididir. Buna rağmen yer kabuğunda bolca bulunduğu için sıklıkla kullanılan bir enerji hammaddesidir. Taşkömürü ise yüksek kalorili kömürler grubundadır. Yerli kaynak potansiyelimizin 12,4 milyar tonu linyitten, 1,33 milyar tonu taşkömüründen oluşmaktadır (Ateşok, 2009; Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2010).

Ülkemizde en önemli taşkömürü rezervleri Zonguldak Havzasında bulunmaktadır. Havzada koklaşabilir rezervler Kozlu, Üzülmüş ve Karadon bölgelerinde yer almaktadır. Koklaşabilir taşkömürü rezervlerinin toplam rezervler içerisindeki payı yaklaşık %67'dir. Türkiye'de taşkömürü tüketiminin büyük bölümü sanayi sektöründe ve kok fabrikalarında gerçekleşmektedir.

Kömür zenginleştirme prosesleri, tane boyutu dağılımı esas alınarak yapılmakta ve buna göre kömürler iri kömür (+25 mm), orta iri kömür (-25+3 mm), ince kömür (3+0,15 mm) ve çok ince kömür (-0,15 mm) olarak ayrılmaktadır.

Kömür hazırlama tesislerinde genel olarak +3 mm kömür ağır ortam ayırıcılarıyla yıkanırken, ağır ortama girmeyen -3 mm kömür -3+0,15 ve -0,15 mm boyutlarına ayrılır. Bu fraksiyonlardan iri olanı spiralle ayrılmaktadır, ince kısımlarındaki kil ve piritin uzaklaştırılması için gravitasyon yöntemlerinin uygulanamadığı durumlarda

flotasyon yöntemi tercih edilebilmektedir. Ancak -0,15 mm boyutlu kömür fraksiyonu susuzlandırma ve flotasyon maliyetleri sebebiyle doğrudan tikinerlerde çöktürülmekte, filtre edilmekte ve düşük fiyatlarla alıcıya sunulmaktadır veya atık barajlarında bekletilmektedir. İnce boyutlu kömürlerin zenginleştirilmesinde karşılaşılan zorlukların yanısıra, bu kömürlerin değerlendirilmesindeki en büyük sorunlardan biri susuzlandırmadır. Bilindiği üzere kömür flotasyonu sonucunda elde edilen köpük/konsantre pülpte katı oranı %20-25 civarında olup, %75-80 su içermektedirler. Bu konsantrelerin susuzlandırılması ve kurutulması sonraki kullanımlar açısından önemlidir. Kömürlerin susuzlandırılması için birçok kimyasal madde kullanılmaktadır. Bu kimyasalların kullanımındaki amaç kömür yüzeylerinin hidrofob (suyu sevmez) hale getirilerek aglomere olması ve gerek tikinerlerde daha kolay çökelmelerini sağlamak (katı-sıvı ayırımı) gerekse birlikte bulundukları sulu ortamı daha kolay uzaklaştırmaktır. Benzer reaktifler flotasyonda da kullanıldığından, flotasyon aşamasında kullanılan kimyasalların, ayırma ve susuzlandırma performanslarının birlikte değerlendirilmesi daha da önemli hale gelmektedir.

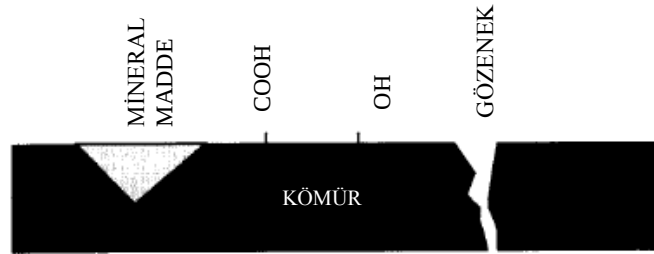
Bunun yanısıra, flotasyon çok ince boyutlarda gerçekleştirildiğinden ve genel olarak kömür şamlarının değerlendirilmesi amacıyla kullanıldığından, bu boyut fraksiyonunda bulunan inorganik maddenin büyük bir kısmını oluşturan kil minerallerinin de üzerinde durulması ve kil minerallerinin gerek flotasyon gerekse susuzlandırma aşamasındaki etkilerinin ortaya konulması da önemlidir. Bilindiği üzere, flotasyonda ince taneli gangın mekanik taşınma yolu ile kömür konsantresi köpüğüne karışması köpüğe gelen su miktarı ile orantılıdır. Köpükteki su kazanımında gerek flotasyon cihazı, çalışma şartları gerekse kullanılan kimyasalların tipi ve miktarı belirleyici parametrelerdir. Dolayısıyla, kimyasalların hem flotasyon hem flotasyon sırasında köpükte su kazanımı hem de flotasyon sonrası susuzlandırma işlemleri üzerindeki etkisinin birlikte araştırılması ve ortaya konması bu kimyasalların daha doğru olarak değerlendirilmesi açısından önemlidir ve bu çalışma kapsamında bu ilişki incelenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Kömür Flotasyonu

2.1.1 Giriş

Kömür organik (maseral) ve inorganik (mineral) maddelerden oluşan heterojen yapılu bir malzemedir. Kömür organik maddesi bitkisel artıkların biyokimyasal ve metamorfik değişimler sonucu birikmesinden oluşur. Kömür çeşitli fonksiyonel grupları barındıran bir hidrokarbon matrisidir. Bunun yanında kömür yüzeyinin heterojenliği; maseral miktarı, inorganik madde içeriği ve gözenek miktarıyla ilgilidir. Bu özellikler kömürleşme derecesine bağlı olarak değişmektedir. Kömürün heterojen yapısı Şekil 2.1’de şematize edilmiştir. Belirli bir kimyasal formüle sahip olmadığı gibi aromatik, alifatik ve oksijenli (hidroksil -OH, karboksil -COOH, karbonil $=C=O$, eterik -O-) fonksiyonel gruplar ve az miktarda S, N gibi elementler içerir.



Şekil 2.1 : Kömürün heterojen yapısı (Laskowski, 2001).

Kömürde bulunan kül yapıcı inorganik safsızlıklar (mineral madde) çoğunlukla kil (kaolinit veya montmorillonit türü), kuvars, karbonatlar (kalsit, dolomit), jips ve piritten meydana gelmektedir. Flotasyon işlemi kül yapıcı safsızlıkların kömürün yanabilen organik kısmından ayrılması için gravite yöntemlerinin yetersiz geldiği durumlarda yaklaşık 0,5 mm altı kömüre uygulanır.

Flotasyon, 1920’lerden bu yana, ince boyutlu kömür ve cevherlerin zenginleştirilmesinde kullanılan bir fizikokimyasal zenginleştirme yöntemidir. Ayırma pülp içerisinde hava kabarcıklarının oluşturulması ve hava kabarcığı ile

temas kuran tanelerin (hidrofoblar) yukarıya doğru, kuramayan tanelerin (hidrofiller) ise aşağıya doğru hareketi ile sağlanır. Maddelerin hidrofob-hidrofil özelliği katı-sıvı, katı-gaz, sıvı-gaz ara yüzeylerindeki kuvvetlerin dengesiyle ilgilidir.

Kömür flotasyonu birçok fazın (katı tane, hava kabarcığı, yağ damlaları) etkileştiği karmaşık bir sistemdir. Bu fazlar hem birbirleriyle hem de suda bulunan çeşitli reaktiflerle (sürfaktan veya kontrol reaktifleri) ve yine suda çözünmüş iyonlarla etkileşirler. Bu süreçte kollektörün veya sürfaktanın yapısı, elektriksel yükü ve kömür yüzeyine yönelme ve bağlanma şekli (kimyasal veya fiziksel adsorplanma) önemli parametrelerdir (Dey, 2012).

Minerallerin çoğu sulu bir ortama girdiklerinde yüzeylerindeki bazı iyonlar suya geçerek mineral yüzeylerinin belirli yüklere sahip olmasını sağlarlar ve mineraller suya verdikleri iyonların yerine suda bulunan hidrate (H^+ ve OH^-) iyonları arayüzeylerinde toplayarak ıslanırlar. Flotasyonda, minerallerin yüzeylerinde toplanacak ve mineralleri ıslanmaz hale getirecek hava kabarcığı vasıtasıyla yüzdürecek toplayıcı (kollektör) olarak adlandırılan kimyasallar kullanılır.

Yüzeylerinde su ile reaksiyon yapacak iyonları bulundurmayan, genellikle bir elementten meydana gelen kükürt, grafit, kömür gibi mineraller kollektöre ihtiyaç göstermeden yüzebilirler. Kömür de doğal olarak yüzebilen bir maddedir. Fakat flotasyon zamanını kısaltmak ve randımanı artırmak amacıyla, bazı nötr hidrokarbonlar, kerosen tipi yağlar ve yakıt yağı kollektör olarak kullanılmaktadır. Taşkömürü flotasyonunda yağların kullanım oranı genellikle düşük iken, kömürleşme derecesi düşük olan linyit flotasyonunda bu oran 6-8 kg/t seviyelerine kadar çıkabilmektedir (Hacıfazlıoğlu, 2011). Köpürtücü olarak, metil izookta nol bütıl karbinol (MIBC) ve izooktanol gibi kısa zincirli alkoller kullanılmaktadır.

Konvansiyonel flotasyon yöntemlerinin etkili olmadığı durumlarda gelişmiş flotasyon yöntemleri (kolon flotasyonu, jet flotasyonu, taşıyıcılı flotasyon, biyoflotasyon vb.) sayesinde 0,45 mm altı kömürlerden süper düşük küllü kömürler elde etmek mümkündür.

2.1.2 Kömürün yüzey özellikleri

Flotasyon sistemlerinde yüzdürülmek istenen katı faz, içinde çeşitli elektrolitleri bulunduran sıvı faz ve kabarcık meydana getiren gaz faz etkileşim halindedir. Flotasyon sisteminin anlaşılması için bu üç fazın arayüzeylerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri bilinmelidir. Bu arayüzeyler dengedeki katı-gaz, sıvı-katı, sıvı-gaz arayüzeyleridir.

İnorganik katıların çoğunun yüzeyi sulu ortamda sudaki hidrate iyonlarla etkileşime geçerek ıslanır. Flotasyonda amaç kollektör diye adlandırılan kimyasallar varlığında yüzdürülecek mineralin yüzeyinde mineral-su arayüzeyi yerine mineral-hava arayüzeyi oluşturmaktır. Mineralin kimyasalla etkileşimi sonucu yüzeyinde hidrofob bir tabaka oluşmaktadır.

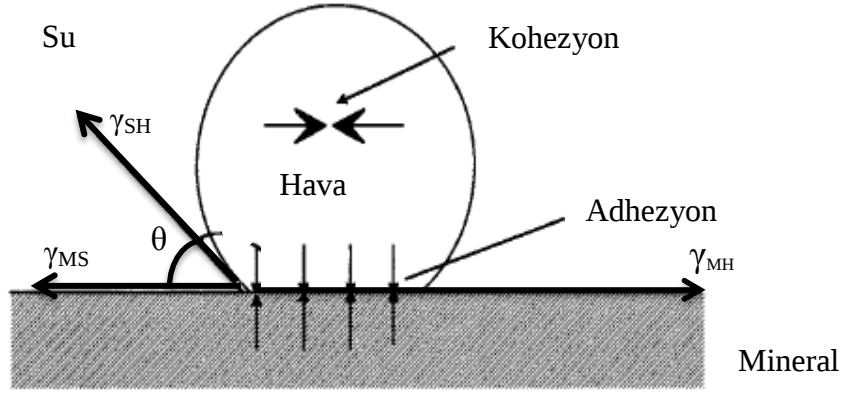
Yüzey gerilimi ve yüzey serbest enerjisini, yüzey alanını birim miktarda izotermal ve dönüşümlü olarak arttırmak için gerekli iş olarak tanımlanmaktadır. Herbir sıvının, kendi içindeki molekülleri, kohezyon çekim kuvvetlerinin, arayüzeydeki moleküller ise adhezyon çekim kuvvetlerinin etkisi altındadır. Adhezyon ve kohezyon çekim kuvvetleri farklı değerde olduğundan arayüzeydeki moleküller, dengesiz çekim kuvvetlerinin etkisi altında bulunur. Gibbs adsorpsiyon denklemi (2.1) yüzey gerilimi verilerinden sıvı yüzeyindeki adsorpsiyon derecesinin hesaplanabileceğini gösterir:

$$\Delta G_f = \gamma_{sg} (\cos \theta - 1) \quad (2.1)$$

ΔG_f , Gibbs termodinamik potansiyelidir (mJ/m^2), γ_{sg} ise sıvı-gaz arayüzey gerilimidir.

2.1.2.1 Temas açısı- Islanabilirlik

Düşük kömürleşme derecesine sahip daha az hidrofob olan kömürler iyi yüzmezken, okside olmamış bitümlü kömürler iyi yüzebilirlik gösterir. Kömürün hidrokarbon iskeleti hidrofobken, yüzeydeki oksijenli fonksiyonel gruplar ve mineral madde hidrofildir ve kömürün totalde yüzebilirliği bu üçünün fonksiyonudur. Gözeneklerin su ile dolu olması da hidrofilliği artırır.



Şekil 2.2 : Sulu ortamda hava kabarcığı ve mineral arasındaki temas açısı (Laskowski, 2001).

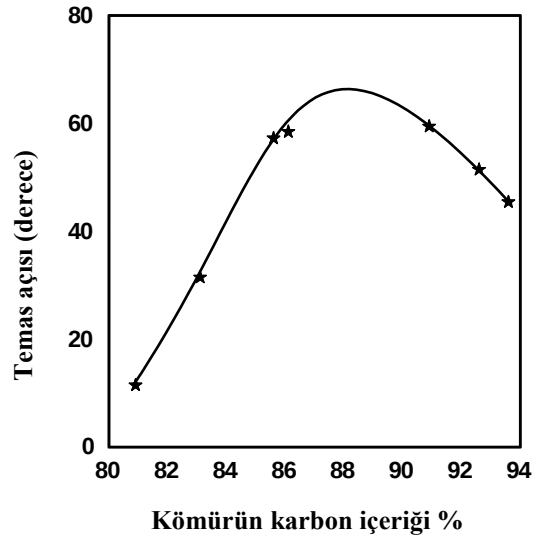
Yüzey gerilimi sabitken temas açısı flotasyon performansı açısından başlıca parametre olmaktadır. Aynı cins moleküller arasında oluşan moleküllerarası çekim kuvvetleri kohezyon, farklı cins moleküller arasında oluşan moleküllerarası çekim kuvvetleri adhezyondur. Dengedeki sistemde adhezyon kuvvetinin bileşenleri dispersif van der Waals kuvvetleri (nötral ve kimyasal yönden doymuş moleküller arasındaki elektriksel etkileşimlerden doğan kısa mesafeli çekim kuvvetleri), Hidrojen bağı kuvvetleri ve katı yüzeyinin yükü varsa elektriksel kuvvetlerdir.

Katı, sıvı, hava üçlü sistemindeki kuvvetler Şekil 2.2’de görüldüğü gibidir. Üçlü fazın dengede olduğu durum Young eşitliği ile ifade edilmektedir:

$$\gamma_{MH} = \gamma_{MS} + \gamma_{SH} \cos \theta \quad (2.2)$$

Burada γ_{MH} mineral-hava arayüzey gerilimini (mN/m veya mJ/m^2), γ_{MS} mineral-su arayüzey gerilimini, γ_{SH} su-hava arayüzey gerilimini, θ ise temas açısını (derece) göstermektedir.

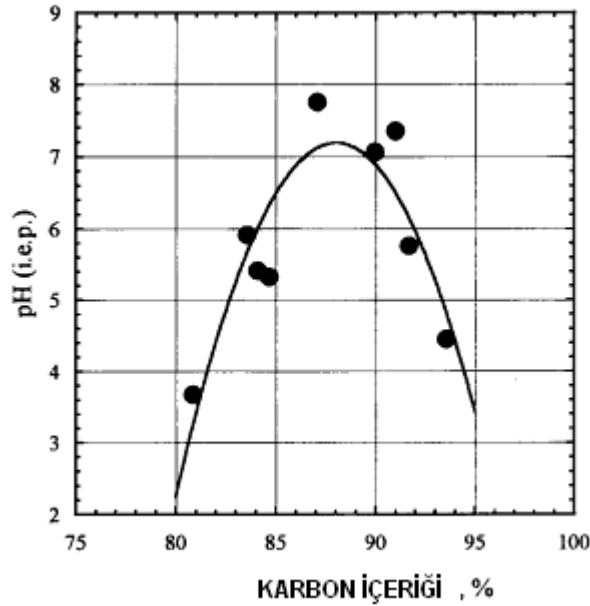
Kömürün hidrofobluğu kömürleşme derecesine göre farklılık arzeder. Karbon miktarına bağlı olarak değişen temas açıları Şekil 2.3’te görülmektedir. Kömürleşme derecesi belli bir seviyeye kadar arttıkça temas açısı yani doğal yüzebilirlik de artar. Karbon içeriği yüksek olan antrasit türü kömürlerde ise temas açısı düşer.



Şekil 2.3 : Kömürleşme derecesine göre değişen temas açısı.

2.1.2.2 Elektriksel çift tabaka

Su içerisindeki bir mineralin yüzeyi hem mineralden suya geçen hem de sudaki hidroksit ve hidrojen iyonları ile etkileşmesi sonucunda bir elektrik yükü kazanır. Mineral yüzeyinin yük kazanması potansiyel tayin edici iyonlar sayesinde olur. Kömürde bu iyonlar H^+ ve OH^- iyonlarıdır. Su ise çeşitli iyonları barındıran bir çözelti halindedir. Bu durumda mineral yüzeyi sudaki zıt yüklü iyonları çeker. Arayüzeylerdeki bu tür iyon konsantrasyonunun artması durumuna adsorpsiyon denmektedir.



Şekil 2.4 : Kömürleşme derecesine göre sıfır yük noktasının değişimi (Laskowski, 2001).

Sıfır yük noktası katı yüzeyini elektriksel bakımdan nötr yapan potansiyel tayin edici iyonların kritik konsantrasyonudur. Çözeltinin pH değeri sıfır yük noktasındaki pH değerinden büyükse katı yüzeyi negatif, küçükse pozitif yüklü olmaktadır.

Kömürün sıfır yük noktası kömürleşme derecesine dolayısıyla karbon içeriğine göre değişmektedir. Bu durum Şekil 2.4'te özetlenmiştir. Düşük kömürleşme derecesine sahip veya okside olmuş kömürlerin yüzeyinde bulunan daha asidik fonksiyonel gruplar (karboksil, fenolik) sıfır yük noktasını asidik değerlere düşürür. Zonguldak bitümlü kömürü için yapılan bir elektrokinetik çalışmada sıfır yük noktası pH 4 civarında bulunmuştur (Sarıkaya ve Özbayoğlu, 1995). Aynı değer Cebeci ve Sönmez (2006) tarafından da doğrulanmıştır.

Su içerisindeki mineral taneciğinin yükü zıt yüklü dengeleyici iyonlar tarafından dengelenir. Denge iyonları difüz tabaka denilen dağılmış iyon tabakasına yayılmış vaziyettedir ve yüzeydeki konsantrasyonları yüzeyden uzaklaştıkça azalarak çözeltinin normal konsantrasyonuna erişir.

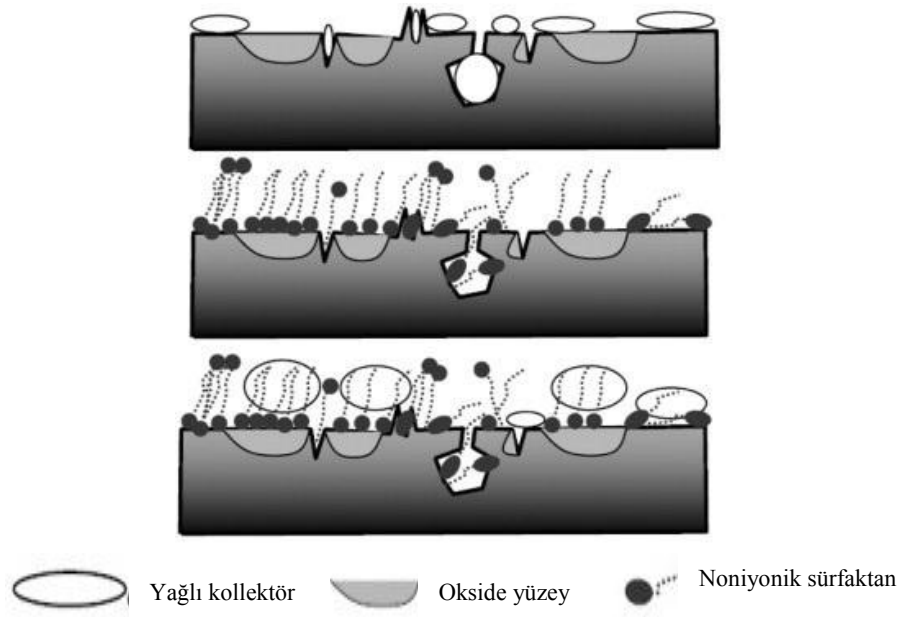
Günümüzde geçerli olan elektriksel çift tabaka modeli Stern modelidir. Bu modele göre katı yüzeyine yaklaşık bir molekül uzaklıkta bir Stern tabaka düşünülür. Bu tabakadaki zıt yüklü iyonlar yüzey potansiyelini lineer olarak azaltır. Bu tabakanın dışında ise dağılmış iyonları barındıran difüz tabaka bulunur. Buradaki potansiyel azalışı lineer olmayıp daha uzun mesafede azalarak sıfırlanır.

Çözeltideki potansiyel belirleyici iyon konsantrasyonu arttıkça yüzeydeki dengeleyici iyon sayısı da artmakta ve elektriksel çift tabaka kalınlığı azalmaktadır. Ters durumda çift tabaka kalınlığı artar ve taneler birbirini daha çok iterek disperse duruma geçerler.

Katı yüzeyindeki elektriksel potansiyel ölçülemezken, yüzeyle difüz tabaka arasında bulunan kayma tabakasının potansiyeli elektroforetik yöntemlerle ölçülebilmekte ve buna zeta potansiyel veya elektrokinetik potansiyel denilmektedir. Zeta potansiyelin mutlak değeri ve işareti flotasyonda mineralin kollektörlerle etkileşiminde büyük önem taşır. Flotasyon dışında susuzlandırma ve dispersiyonda da elektrokinetik potansiyel önemlidir (Atak, 1990).

2.1.3 Flotasyon reaktifleri

Şekil 2.5'te görüldüğü üzere yağlı kollektör kömürün hidrofobik yüzeylerine ve gözeneklerine yayılır. Noniyonik sürfaktan ise hem hidrofobik bağlarla hidrofobik yüzeylere adsorbe olmakta hem de hidrojen bağlarıyla okside olmuş yüzeylere adsorplanmaktadır. Kritik bir konsantrasyondan sonra çift tabaka halinde adsorplanma gerçekleşirse yüzey hidrofilleşmekte ve flotasyon olumsuz etkilenmektedir. Noniyonik sürfaktanla birlikte yağlı kollektör kullanıldığı durumda ise yağlı kollektörün okside yüzeylere yayılma şansı artmaktadır.



Şekil 2.5 : Yağlı kollektörün ve noniyonik sürfaktanın kömür yüzeyine adsorpsiyon mekanizması (Xia vd., 2013).

Son yıllarda çalışmalar özellikle düşük kömürleşme dereceli veya okside olmuş kömürlerin yüzebilirliğini arttırmada yeni kollektörler ve kollektörün etkinliğini arttırmaya yardım eden reaktifler üzerine yoğunlaşmaktadır. Kollektörün etkinliğinin artması kömürdeki ve kollektördeki oksijenli grupların birbirleriyle hidrojen bağları yapabilme olasılıklarının arttırılması şeklinde olur. Okside motorin kullanarak okside kömürün flotasyonda ayırma etkinliği arttırılmıştır (Xia ve Yang, 2013).

Yağlı kollektörle birlikte yardımcı bir reaktifin (promoter), sürfaktanın veya oksijenli fonksiyonel grupların sisteme ilavesi hidrojen bağı yapabilecek yüzeylerin artmasına sebep olmakta ve okside kömürün yüzebilirliğini önemli ölçüde arttırmaktadır (Dey, 2012).

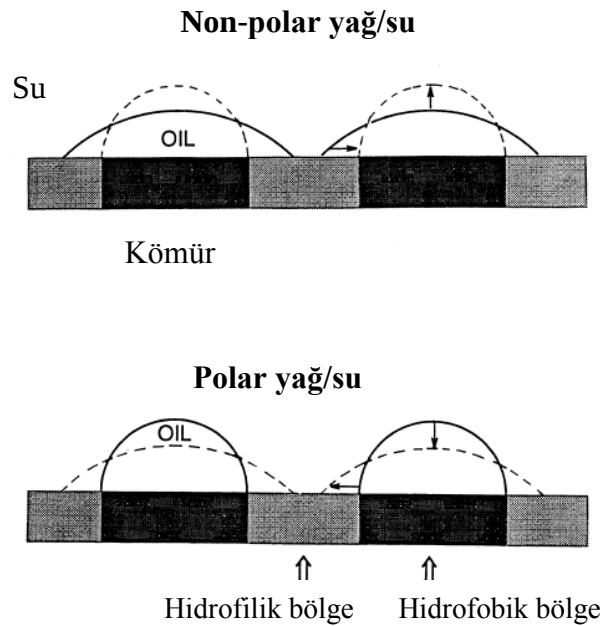
2.1.3.1 Yağlı kollektörler

Kömür doğal hidrofob bir kayadır. Buna rağmen flotasyon süresini kısaltmak ve verimi arttırmak amacıyla köpürtücüyle birlikte suda çözünmeyen fuel oil, kerosen, mazot, dodekan, nonilbenzen gibi apolar nötr hidrokarbon yağları sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tür alifatik hidrokarbon yağlarının kömür yüzeyindeki polar olmayan kısımlara yayılması ve tanelerin hidrofobluğunu arttırması van der Waals bağlarının etkin olduğu fiziksel adsorpsiyon yoluyla gerçekleşir. Yağlı kollektörün etkinliği hidrokarbon zincir uzunluğuna bağlıdır.

Katı yüzeyindeki su moleküllerini iteleyeni yağ fazının katı üzerinde yayılma katsayısı $S_{y/s}$ denklemde gösterilmektedir:

$$S_{y/s} = \gamma_{y/s}(\cos \theta - 1) \quad (2.3)$$

Burada $\gamma_{y/s}$ yağ-su arayüzey gerilimini, $\cos \theta$ temas açısını ifade etmektedir. Şekil 2.6'da non-polar yağların sadece hidrofobik yüzeylere yayıldığı, polar yağların ise yüzey gerilimindeki farklılıktan dolayı hidrofilik yüzeylere de yayılabildiği görülmektedir.



Şekil 2.6 : Nonpolar ve polar yağlı reaktiflerin yüzeye yayılması (Jia vd., 2002).

Düşük kömürleşme derecesine sahip veya ortam şartları dolayısıyla okside olmuş kömürler su molekülleriyle hidrojen bağları kurarak kömür yüzeyinin hidrofilliğini arttıran oksijenli karboksil, fenolik, karbonil fonksiyonel grupları daha çok

barındırmaktadır. Bu sebeple alifatik yağlar okside olmuş hidrofilik kömür flotasyonunda düşük performans göstermektedir. Aromatik halka içeren hidrokarbon yağları ise alifatik yağlara kıyasla flotasyonda ayırma verimini arttırmaktadır. Kollektördeki aromatik kısımlarla kömürdeki aromatik kısımlar arasındaki güçlü π bağları (aromatik-aromatik etkileşim) alifatik zincirin kömürle yaptığı bağa oranla daha güçlüdür (Jia vd., 2000).

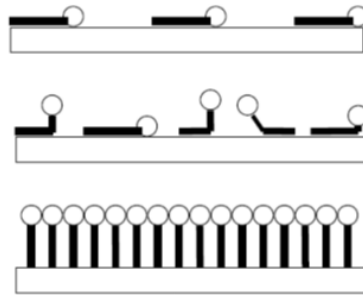
Taşkömürü flotasyonu için köpürtücü ile birlikte az miktarda kollektör yeterli olabilmekteyken, daha az hidrofobiklik gösteren alt bitümlü veya okside olmuş kömürler çok yüksek miktarda kollektör kullanımı gerektirir. Kollektöre oksijenli fonksiyonel gruplar ilave edilerek bu grupların kömürün oksijenli gruplarıyla hidrojen bağları yapması sağlanarak flotasyon performansı artırılabilir.

Yağlı kollektörlerin emülsifiye edildiğinde tanecik-kollektör çarpışma olasılığını artırarak verimi arttırdığı deneysel çalışmalarla ortaya konmuştur. Emülsifiye edici sürfaktanlar yağ-su arayüzey gerilimini düşürür ve yağın kömür yüzeyine yayılmasını kolaylaştırır (Moxon ve Keast-Jones, 1986; Burat, 2003).

Yüksek miktarlarda kullanılıp yüksek hızlarda daha uzun süre pülple muamele edildiğinde ise aglomerasyon flotasyonu gerçekleşmektedir.

2.1.3.2 Sürfaktanlar

Sürfaktanlar kömür flotasyonunda genelde yağlı kollektörle birlikte yardımcı reaktif olarak kullanılmaktadır. Anyonik, katyonik ve non-iyonik sürfaktanlar bu amaçla kullanılabilir. Emülsifiye edici olarak kullanıldıklarında yağ damlacıklarını su içinde disperse etmekte ve artan yağ damlacığı miktarı tanecik-kollektör çarpışma olasılığını arttırmaktadır (Yu vd., 1990). Ayrıca sürfaktanlar yağın kömür yüzeyine yayılmasını kolaylaştırmak üzere kömür-yağ arayüzey gerilimini düşürmektedir (Dey, 2012).



Şekil 2.7 : Sürfaktanların düşük adsorpsiyon yoğunluğundaki davranışları

Adsorpsiyon yoğunluğunun ve yüzey kaplama oranının düşük olduğu durumlarda hidrofobik kuyruk mineral yüzeyine paralel bir şekilde veya L şeklinde yönelebilir. Daha çok molekül adsorplandıkça sıkı bir şekilde dizilim başlar ve baş kısmı dışarı yönelecek şekilde yüzeye dik bir sürfaktan tabakası oluşur. Bu durum Şekil 2.7’de gösterilmektedir.

Tek başına kollektör işlevlerinin araştırıldığı çalışmalar da mevcuttur. Banford ve Aktaş (2004) Triton X-405’un flotasyon performansını incelemiştir. Sürfaktanlar birbirinden farklı özellik gösteren iki kısmı (hidrofil baş grup ve hidrofob kuyruk) aynı yapıda bulundurlar. Polioksietilenlenmiş alkilfenoller (nonilfenol) ve polioksietilenlenmiş lineer alkoller en yaygın kullanılan non-iyonik sürfaktanlardır. Etilenoksit zincirinin uzunluğu üretim esnasında ayarlanabilmekte ve bunun uzunluğu sürfaktanın kullanım alanını belirlemektedir. Sürfaktanın ıslatma veya emülsiyon meydana getirme veya deterjanlık özelliklerinden birinin ön planda olması hidrofob kısmın uzunluğu ve hidrofil kısmın moleküldeki yeri ve sayısı ile ilgilidir. Non-iyonik sürfaktanlar ters çözünürlük karakteristiği gösterirler ve yüksek sıcaklıklarda çökeltme yapabilirler. Çökelmenin başladığı sıcaklığa “bulanma noktası” denir.

Sürfaktanın hidrofobik karakteri arttıkça su çözünürlüğü azalır ve buna karşın yağ çözünürlüğü artar. Sürfaktanın temel özelliklerini belirlemede hidrofobik ve hidrofilik kısımları arasındaki denge kritik bir faktördür. Bu hidrofil-lipofil dengesi, ya da HLB olarak belirtilir. HLB değeri 10’dan küçükse yağ içinde su emülsifiye edici, 10’dan büyükse su içinde yağ emülsifiye edici olarak kullanılırlar. HLB değeri 10-15 arasındaysa ıslatma ajanı, 12-15 arasındaysa iyi deterjan özellik gösterirler. Düşük HLB değerine sahip olanlar daha iyi susuzlandırma ajanıdır. Buradaki dezavantaj HLB 10 dan küçükse reaktifin suda çözünmemesidir. Suyun yüzey gerilimini düşürmek için bu durumdaki çözeltiye hidrokarbon çözücü eklenir (Asmatülü, 2001). HLB değeri Griffin tarafından ortaya atılmıştır ve şu denklemle hesaplanır:

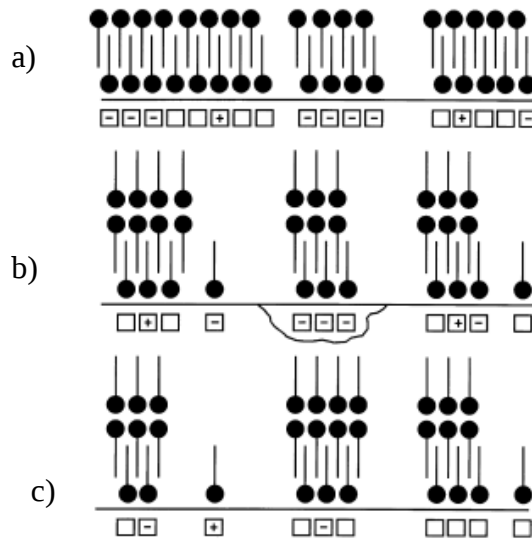
$$HLB = MH / (MH + ML) * 20 \quad (2.3)$$

MH=hidrofil kısmın molekül ağırlığı ve ML=lipofil kısmın molekül ağırlığıdır.

Süpfaktan moleküllerinin yönelme şekli, zincir uzunlukları adsorpsiyon sürecini önemli ölçüde etkiler. Kömür yüzeyine süpfaktan adsorpsiyonu iki şekilde gerçekleşmektedir. Birincisi kömürün polar olmayan yüzeylerine adsorplanarak polar olmayan grupların dışarı yönelmesiyle, ikincisi süpfaktanın pozitif yüklü kısmı kömürün negatif yüklü bölgelerine bağlanmasıyla olur.

Tetrahidrofurfuril eter cinsi non-iyonik süpfaktanlar kullanıldığında adsorpsiyonun üç şekilde gerçekleştiği öne sürülmüştür (Jia vd., 2000):

1. Süpfaktanın polar kısmı kömürdeki oksijenli fonksiyonel gruplarla Hidrojen bağları yapar.
2. Alifatik hidrokarbon zinciri ile kömür yüzeyindeki hidrofobik kısımlar hidrofobik bağlar yapar.
3. Süpfaktandaki aromatik benzen halkası ile kömür yüzeyindeki aromatik kısımlar π bağları yapar.



Şekil 2.8 : Maksimum adsorpsiyon yoğunluğunda non-iyonik süpfaktanın a) linyit yüzeyine b) alt bitümlü kömür yüzeyine c) bitümlü kömür yüzeyine adsorpsiyonu (Crawford ve Mainwaring, 2001).

Kömürün hidrofobluğunun artması için hidrofilik baş kısmıyla yüzeye adsorplanıp hidrofob kuyruğunu açıkta bırakan süpfaktanlar kullanılmalıdır. Katyonik süpfaktanlar nötr ve negatif yüzeylere, anyonik süpfaktanlar nötr ve pozitif işaretli yüzeylere, non-iyonik süpfaktanlar ise her türlü yüzeye adsorbe olabilirler. Süpfaktan

ilavesinin linyitin hidrofobluğuna etki etmediği, alt bitümlü ve bitümlü kömürlerin ise hidrofobluğunu arttırdığı gösterilmiştir. Daha fazla fonksiyonel grup barındıran düşük dereceli kömürde hemi-misel oluşumu sebebiyle yüzey hidrofilliği artarken, yüksek kömürleşme derecesine sahip kömürlerde hemi-misel üzerine 3. tabaka adsorplanma hidrofobluğu arttırmıştır (Crawford ve Mainwaring, 2001). Bu durum Şekil 2.8’de özetlenmiştir.

Aktaş (2001) noniyonik Triton X-100 sürfaktanının Tunçbilek linyiti ve Zonguldak taşkömürü yüzeyine adsorpsiyonunu incelemiştir. Birim alana adsorplanan reaktif miktarı kömürün kimyasal yapısı, yüzey alanı ve gözenek miktarıyla ilgili olduğu ortaya konmuştur (Aktaş ve Woodburn, 1995).

2.1.3.3 Köpürtücüler

Köpürtücüler polar ve non-polar grupları eşit dağılmadığından seçimli olarak havu/su arayüzeyine adsorplanabilen sürfaktanlardır. İyonik kollektörlerin aksine polar gruplarındaki hidroksil (-OH), eterik (-O-) ve karbonil (-C=O) gruplar mineral yüzeyleriyle güçlü bağlar kuramazlar (Laskowski, 2001).

Birbirine sık olarak bağlanmış küçük kabarcıklı köpük ile yüksek flotasyon verimi elde edilir. Böyle bir köpük yapısı köpüğü saran minerali daha rahat taşır ve çökerek pülpe karışmasını önler. Diğer yandan, gevşek yapılı ve büyük kabarcıklı köpük taşınan gang parçalarının kolayca çökmesine sebep olarak büyük oranda verimin düşmesine neden olur. Ancak, iri boyutlu kabarcıklar ile daha temiz ürünler elde edilir. Kömür flotasyonunda en yaygın kullanılan köpürtücüler; alkoller (MIBC, oktanol, hegzanol), çamyağı, poliglikoller (Dowfroth 200, DF-250, DF-40) ve kresilik asittir (Banford vd., 1998).

Kömür flotasyonunda MIBC daha seçimli davranmıştır. Yanabilir verim değeri ise yaklaşık olarak Dowfroth-250 ile aynı sonucu vermiştir. Bunun başlıca nedeni MIBC’nin hem toplayıcı hem de köpürtücü özelliğinin bulunmasıdır (Hacıfazlıoğlu, 2011).

Köpürtücüler daha ince boyutlu ve stabil köpük oluşturma amacıyla kullanılmaktadır. Köpürtücü verimi kritik kabarcık birleşmesi konsantrasyonu (CCC) ve dinamik köpürme indeksi (DFI) ile ölçülmüştür (Laskowski, 2004). Köpürtücünün kabarcık boyutuna etkisi birleşmeyi önleme kapasitesiyle ilgilidir.

Köpürtücü konsantrasyonu arttıkça birleşme düşer. Belli bir konsantrasyondan sonra (kritik birleşme konsantrasyonu) artan konsantrasyon köpük boyutuna etki etmez (Melo ve Laskowski, 2006).

Köpürtücünün rolü birleşmeyi önleyerek köpük boyutunu yeterli derecede küçültmek köpüğü stabilize etmektir. Böylece hidrofobik taneler kolayca köpük zonuna ve drenaja uğramadan (pülpe geri dönmeden) konsantreye taşınacaktır. Bu da flotasyon kinetiğini arttırmaktadır. Çok nadir olarak kollektör görevi gören köpürtücüler de kullanılmaktadır.

2.1.4 Flotasyon Teknolojisi

Son yıllarda ultra ince kömürü zenginleştirmek üzere yeni flotasyon teknolojileri geliştirilmiştir. Mekanik hücrelerden farklı olarak mekanik karıştırma sistemi olmayan flotasyon kolonlarında hava kabarcıkları özel bir kabarcık üretme sistemi (sparger) ile kompresörden sağlanmaktadır. Leeds kolonu, Dolgulu kolon, Flotaire kolonu, Hydrochem kolonu, Microcel kolonu, Siklonik flotasyon kolonu ve Siklo-mikrokabarcık kolonu gibi alternatif tasarımları bulunmaktadır (Jena vd., 2008).

Son 30 yıl içerisinde geliştirilmiş olan çok sayıda flotasyon hücresi bulunmaktadır. Bunlardan öne çıkan jet flotasyon hücrelerinde pülpin jet hareketiyle kabarcık oluşumu sağlanır. Jameson hücresi, LM hücresi, hidrojet hücresi örnek verilebilir. Pnömatik flotasyon hücrelerinde ise kabarcık oluşumunda basınçlı hava aeratör içinde pülpe verilir ve pülp havalandırılır. Bahr, Ekof, G-Cell gibi çeşitleri vardır. Diğer bir flotasyon teknolojisi ise santrifüj flotasyon hücreleridir. Gözenekli duvara hava enjeksiyonu yapıldığında oluşan yüksek makaslama kuvvetleri sayesinde mikrokabarcıklar oluşur (Hacıfazlıoğlu, 2007).

Jameson hücresinde herhangi bir havalandırma tertibatına gerek duyulmaksızın hava kendiliğinden venturi etkisi ile hücre içerisine atmosferden emilir. Kolon flotasyonuna göre daha hızlı flotasyon yeteneğine sahip ve sistemde oluşan kabarcık çapı oldukça küçüktür. Özellikle şlam kömür flotasyonu için tercih edilmektedir.

Mekanik, konvansiyonel kolon ve jet flotasyon (Jameson hücresi) ile yapılan kömür flotasyonu çalışmalarının çoğunda Jameson hücresinin daha iyi sonuç verdiği belirtilmektedir. Ancak, Jameson hücresinin gelişmiş kolon flotasyonu (Dolgulu ve Microcel gibi) hücreleri ile karşılaştırılması durumunda daha düşük performans gösterdiği belirtilmektedir. Bitümlü kömür şlamının mekanik, kolon ve Jameson

hücrelerinde flotasyon performansını inceleyen çalışmalar (Güney vd, 2002; Hacıfazlıoğlu, 2006) kolon flotasyonundaki yüksek köpük derinliği ve yıkama suyu ilavesi daha temiz kömürlerin elde edildiğini göstermiştir. Ancak, yanabilir verim içeriği diğer hücre verilerine göre daha düşük bulunmuştur. Jameson ve mekanik hücre flotasyonunda süpürme kademesinin uygulanması ile benzer yanabilir verimler elde edilmiş ancak kül giderme başarısının Jameson hücresinde daha yüksek olduğu saptanmıştır.

Düşük kömürleşme derecesine sahip veya okside kömürler, bitümlü kömürlerin aksine yağlı kollektörlerle yeterli verimle yüzdürülemez. Yüzeydeki hidroksil, karbonil ve fenol grupların varlığı ve yüzey nemliliği hidrofobluğu azaltır. Flotasyon öncesi öğütme, ön karıştırma, ultrasonik ve termal işlemler, mikrodalga, kuru kömürü reaktifle direkt muamele etme bu tür kömürlerin hidrofobluğunu arttırmak için kullanımı araştırılan yöntemlerdir (Xia vd., 2013).

Hem iyonik hem noniyonik sürfaktanlar vasıtasıyla kömürün yüzey özellikleri değiştirilebilmektedir. Bu sürfaktanlar yağlı kollektörlerle birlikte kollektör etkinliğini arttırmak için de kullanılabilir. Çeşitli hidrokarbon karışımlarının veya kopolimerler, uzun zincirli aminler, yağ asidi amidlerin de okside kömürün yüzeyliliğini arttırdığı gözlenmiştir.

2.2 Flotasyonda Gang Taşınımı

Kömür flotasyonunda katı (kömür+mineral madde) kazanımı gerçek flotasyon (hidrofob tanelerin seçimli kazanımı), mekanik taşınma (iki kabarcık arası sıvı filmlerde ve üç kabarcık arası plateau sınırlarında bulunan çok ince gang minerallerinin konsantreye taşınması), agregasyon (hidrofob tanelerin salkımlaşması sonucu boşluklarda hapsolan gangın konsantreye taşınması) ve drenaj (birleşme ve köpüklerin sönmesi sonucu suyun ve tanelerin gravite etkisiyle pülpe geri dönmesi) olaylarının bir fonksiyonudur. Pülp kollektörle muamele edilir, yüzdürülmek istenen mineral hidrofob özellik kazanır, tanka verilen havayla oluşan kabarcığa yapışarak pülp-köpük arayüzeyine gelir, burada köpük zonu boyunca yükselerek konsantre olarak toplanır. Bu proses gerçek flotasyon olarak adlandırılır. Bunun dışında yukarıda sayılan diğer olaylar flotasyonda yanabilir verimi ve konsantrenin kül içeriğini önemli ölçüde etkiler.

2.2.1 Agregasyon sonucu hapsolma

Kömür flotasyonunda agregasyon iri hidrofobik kömür taneciklerinin topaklanarak ara boşluklarında gang hapsederek bunları köpük zonuna taşınması durumudur. İstenmeyen kül yapıcı çok ince boyutlu mineraller daha iri boyutlu hidrofob aglomeratların ve hava kabarcıklarının ara boşluklarında hapsolur. Sistemde iri boyutlu tane olmadığı durumlarda agregasyon gerçekleşmez. Agregasyon kömürün hidrofobluğu ve yağlı kollektör miktarı arttıkça artmaktadır (Polat vd., 2003).

Hidrofobik taneler geniş bir pH aralığında hidrofobik çekim kuvvetleriyle etkileşip topaklanabilirken, hidrofil taneler sıfır yük noktası civarında itme kuvvetlerinin en az olduğu pH'da van der Waals etkileşimleriyle agregasyona uğrarlar.

Kimyasal ve mekanik yollarla kömürün disperse edilmesi agregasyonu dolayısıyla kül kazanımını azaltmaktadır. Bunun yanında yağlı kollektörler yerine iyonik karakterli yağ asitleri kullanıldığında yanabilir verimin azaldığını ancak çok daha temiz lave elde edildiğini gösteren çalışmalar mevcuttur. Bu durum yağlı kollektörün agregasyona ve konsantreye gang taşınımına sebep olmasıyla açıklanmıştır (Sis vd., 2003).

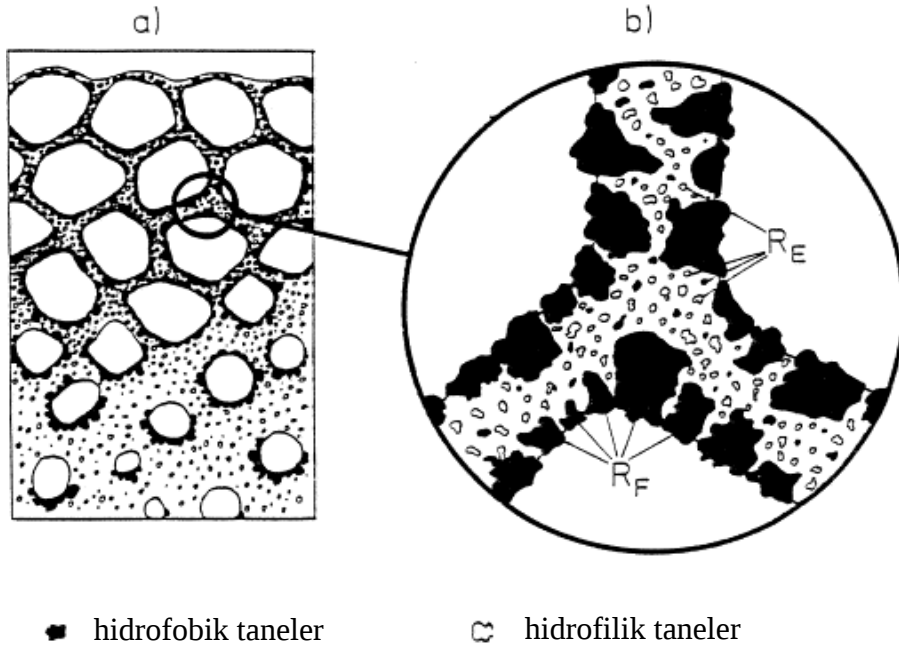
2.2.2 Mekanik taşınma

Mekanik taşınma çok ince gang minerallerinin kabarcıklara bağlanmadan iki kabarcık arasındaki sıvı filmlerde veya üç kabarcığın birleşme boşlukları olan Plateau sınırlarında pülpten köpük zonuna oradan da, filmler yeterince dayanıklı ve drenaja karşı koyabiliyorsa konsantreye taşınmasıdır. 50 µm'dan daha ince taneler için söz konusudur (Yianatos, 2009).

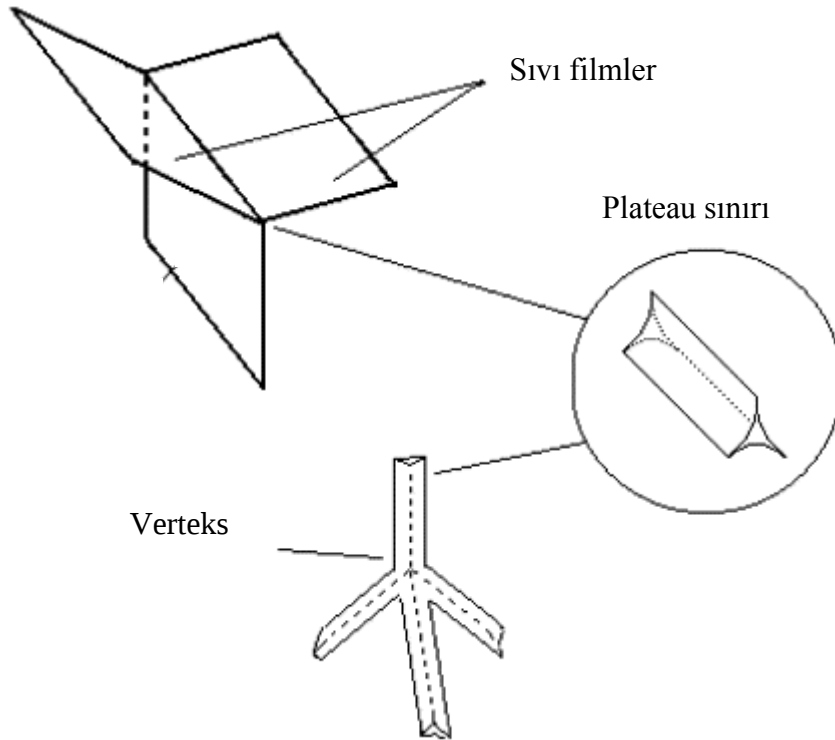
Mekanik taşınma iki aşamalı bir proses olup ilkinde tane pülp-köpük arayüzeyine taşınır, ikincisinde köpükten konsantreye taşınma gerçekleşir. Köpük drenajı ise birleşme ve kabarcığın sönmesi sonucu suyun ve tanelerin pülpe geri dönmesi durumudur. Bu durum filmler stabil olmayıp deforme olduklarında (küresellikten elipsoid geometriye geçtiklerinde) gerçekleşir (Banford vd., 1998). Köpük zonundaki taneler:

- Kabarcıklar arası filmlere tutunmuş olan hidrofob taneler
- Plateau sınırları içinde tutunmadan duran hidrofob veya hidrofil taneler (mekanik taşınmaya uğramış gang minerali veya birleşme ve kabarcıkların patlaması sonucu tutunduğu filmde kopan hidrofobik taneler)

olarak ikiye ayrılmaktadır. Köpük zonuna su ve tanecik taşınmasını sağlayan kabarcıklar arası sıvı filmler, Plateau sınırı (3 kabarcık arası boşluk) ve verteksler (4 adet Plateau sınırlarının birleşme noktası) şekilde gösterilmektedir.



Şekil 2.9 : Flotasyonda kazanım (gerçek flotasyon R_F + mekanik taşınma R_E)
a) flotasyon köpük zonu b) kabarcıklar arası zon (Shubert, 1999).



Şekil 2.10 : Kabarcıklar arasındaki gang taşınımının gerçekleştiği sıvı filmler, Plateau sınırı ve verteks

Birçok araştırmacı mekanik gang taşınımını en aza indirmek için tane boyutu, köpük stabilitesi ve boyutu, köpürtücü cinsi ve miktarı, köpük yüksekliği, karıştırma hızı, hava miktarı, pülp te katı oranı gibi operasyon parametrelerinin etkilerini incelemiştir (Savassi vd., 1998; Neethling ve Cilliers, 2002; Zheng vd., 2005; Çilek, 2009).

Beslenen malzemedeki ince boyutlu malzeme oranı arttıkça gang taşınımının arttığı deneysel çalışmalarla gösterilmiştir. Bunun yanında karıştırma hızının ve pülp te katı oranı azaltıldığında da konsantrenin kül içeriğinde azalma gözlenmiştir (Akdemir ve Sönmez, 2003).

Köpük karakteristiği mekanik taşınmayı önemli ölçüde etkiler. Köpük stabilitesi kullanılan köpürtücü cinsi ve miktarı ile olduğu kadar tane boyutu, şekli ve hidrofobluğuyla da ilgilidir.

Köpürtücünün kabarcık boyutuna etkisi birleşmeyi önleme kapasitesiyle ilgilidir. Çok düşük köpürtücü miktarlarında birleşme olur ve köpükler birleşerek patlar. Köpürtücü konsantrasyonu arttıkça birleşme olasılığı düşer. Belli bir konsantrasyondan sonra (kritik birleşme konsantrasyonu) artan köpürtücü konsantrasyonu köpük boyutuna herhangi bir etki yapmaz (Cho ve Laskowski, 2002). Çok yüksek konsantrasyonlarda yine stabiliteyi bozar (Qu vd., 2013).

Çok ince hidrofob tanelerin sıvı filmler arasında köprüler kurarak birleşmeye sebep olduğu ve stabiliteyi düşürdüğü gözlenmiştir. Kollektör miktarına bağlı olarak tanelerin hidrofobluğu değişir, bu yüzden kollektör cinsi ve miktarı da köpük stabilitesini dolayısıyla gang taşınmasını etkiler (Boylu ve Laskowski, 2007). Temas açısının belli bir değere kadar artması su kazanımını azaltmakta, belli bir değerden sonra ise su kazanımını arttırarak flotasyon randımanını düşürmektedir (Schwarz ve Grano, 2005). Daha sıkı örgülü ve ince kabarcıklı bir köpük yapısı daha çok su taşınmasına dolayısıyla daha çok tane taşınmasına sebep olur.

Hava akış hızı arttırıldığında köpüğün hücre içinde yükselme ve hücreyi terketme hızı da artmaktadır. Bu artış hava kabarcıklarının yer değiştirme hızını azaltarak gang taşınımını arttırır. Köpük zonu yüksekliğinin artışı kabarcığın daha uzun süre köpük zonunda kalmasına ve drenaj olasılığını arttırarak kabarcıklar arasında konsantreye taşınan ince tane miktarını azalmasına sebep olmaktadır. Mekanik taşınma derin köpük zonuna sahip kolon flotasyonunda daha az olmasının sebebi de budur. Aynı zamanda kolon flotasyonunda yıkama suyu verilerek hidrofilik gang minerallerinin

drenajı sağlanır (Angadi vd., 2012). Köpük alma süresi de taşınan su ve gang miktarını arttıran bir operasyon parametresidir.

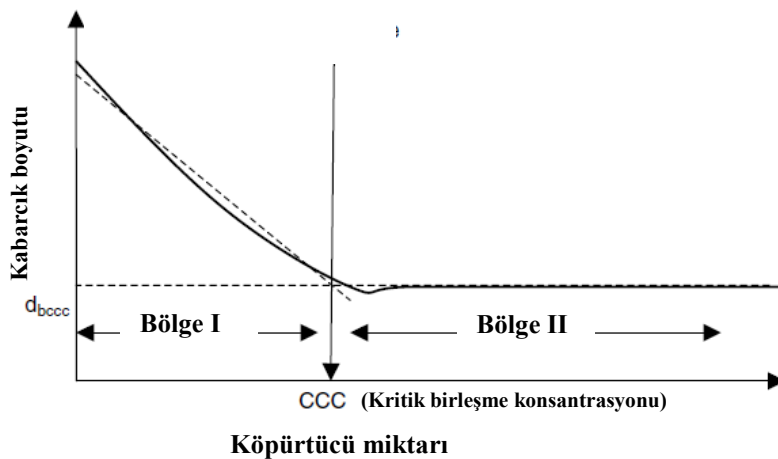
Mekanik taşınmayı karakterize etmede çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Deneysel sonuçlar su kazanımıyla gang kazanımı arasında lineer bir ilişki ortaya koymaktadır. Bu ilişkinin yüksek miktarda su kazanımlarında lineer olduğu, düşük su kazanımlarında ise parabolik olduğu çeşitli çalışmalarda gözlenmiştir.

Mekanik taşınma faktörü EF su ve gang kazanımı arasındaki ilişkiden yola çıkılarak hesaplanır:

$$EF = \frac{R_a}{R_w} \quad (2.4)$$

Eşitlikte R_a gang kazanımını, R_w su kazanımını göstermektedir (Yianatos vd., 2009).

George, Nguyen ve Jameson (2004) mekanik taşınma ve gerçek flotasyon miktarlarını karakterize eden yöntemleri özetlemişlerdir. Bunlar Trahar, Warren ve Ross and Van Deventer yöntemleridir. Bunlara ilave olarak hidrofil-hidrofob taneler yöntemini ortaya atmışlardır. Tesislerde kullanılan suyun tesise geri beslenmesinin bir sonucu olarak flotasyon suyu iyon bakımından zenginleşmektedir. Tuzlu suyun kömür flotasyonuna etkisini inceleyen çalışmalar tuzlu suyun normal suya göre yanabilir verimi arttırdığını göstermiştir fakat mineral maddeye etkisi üzerine çalışma sayısı azdır. Wang ve Peng'e göre (2013) saf suya kıyasla tuzlu su kabarcık boyutunu küçültmekte, yanabilir verimi arttırmakta ve mekanik taşınmayı da arttırarak konsantrenin kül içeriğini arttırmaktadır.



Şekil 2.11 : Flotasyonda köpürtücü miktarının kabarcık boyuna etkisi (Melo ve Laskowski, 2007)

Melo ve Laskowski (2007) sistemde katı olmadığında en yüzey aktif köpürtücünün (suyun yüzey gerilimini en çok düşüren) köpüğe en çok suyu taşıdığını göstermiştir. Sisteme katı ilave edilen üçlü sistemlerde ise ikili sistemde en az su taşıyan köpürtücüler başarılı olmuştur. Şekil 2.11’de görüldüğü üzere köpürtücü miktarı arttıkça kritik kolaesans konsantrasyonuna kadar kabarcık boyutu kolaesans miktarıyla belirlenir ve boyutu gittikçe azalır. Bu durumdaki ince boyutlu kabarcıklar konsantreye hem daha çok katı hem daha çok su taşır. Bu konsantrasyondan sonra köpük boyutu değişmez.

2.3 Kömürün Susuzlandırılması

2.3.1 Endüstriyel susuzlandırma

Nakliye, stoklama gibi işlemlerde kolaylık sağlamak, yakma sistemlerinde enerji kaybını azaltmak, teknolojik gereksinimlere uymak gibi sebepler lavvardan çıkan ürünün susuzlandırılmasını zorunlu kılmaktadır. Bunun yanında çok ince taneli kömürlerin susuzlandırılması çevresel bir zorunluluktur. Mekanik susuzlandırmayla kömürün nemi belli bir limite kadar indirilebilmektedir. Daha düşük nem değerlerine ulaşmak için kurutma işlemi gerekmektedir. Taşkömürü için koklaştırma %8, briketlemede %4, yakma sistemlerinde kullanımı için %2’den fazla nem istenmez. Tipik bir lavvarda ince boyutlu kömür için en çok tercih edilen yöntem tikinerlerde çöktürmeyi takiben filtrasyon, son olarak da kurutmadır. Tikinerden çıkan %35-45 nem içeren kıvamlandırılmış pülüpün nemi filtrasyonla %10-20 civarına, kurutmayla ise %5’e indirilmektedir (Ateşok ve Kangal, 2012).

Filtrasyon temel olarak pülüp içindeki katı tanelerin gözenekli bir filtre ortamının üzerinde tutularak, pülpteki sıvının filtre ortamının içinden akışının basınç farkı (yerçekimi, vakum, basınç, santrifüj) uygulanarak sağlandığı bir katı-sıvı ayırma yöntemidir.

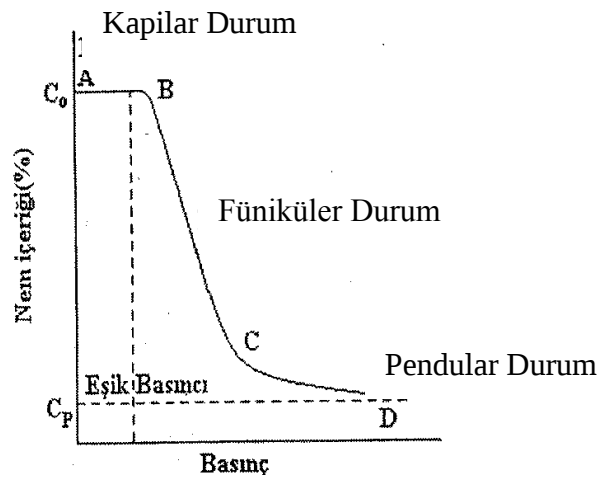
İnce kömür yıkama ünitesinin olmadığı durumlarda, çoğu lavvar elekli sepet tipi santrifüj kullanarak, 1 mm x 150 µm boyutunda kömür susuzlandırır. 150 µm altında susuzlandırma maliyetleri kat kat fazladır. Bu durumda eğer bu boyutun altındaki malzemenin toplam ürün içerisindeki oranı %10’dan fazla değilse ekarte edilir. Eğer bu boyuttaki malzeme de yıkanacaksa tesislerin büyük çoğunluğunda diskli veya tamburlu filtreler, tabakalı ve çerçeveli filtre presleri veya yatay bantlı filtreler

kullanılmaktadır. Santrifüj susuzlandırıclar basınçlı filtrelerin aksine devamlı çalışır. Performansları değerlendirildiğinde santrifüj susuzlandırııcı daha düşük nem değerleri sağlasa da katı kazanma verimi düşmektedir.

Flotasyon işlemi görmüş kömürün pülpte sıvı oranı yaklaşık %80'dir. Bu pülp tikinerlerde çöktürülerek %50 nemli akışkan bir çamur haline geldikten sonra filtrasyon ünitesine verilir. Burada %20-30 neme sahip bir kek elde edilir. Bu işlemde ilave edilen kimyasallarla nem oranı ve kekleşme süreci daha da azaltılabilmektedir.

Kömürdeki su serbest su, kapiler su ve moleküler su olarak sınıflandırılmaktadır. Pülpu oluşturan suyun büyük çoğunluğu serbest sudur ve bu su mekanik susuzlandırma yöntemleriyle (eleme, çöktürme, santrifüjleme) kolayca giderilmektedir. Kapiler su ise birbirine çok yakın tanecikler arasındaki kapilerlere tutunmuş sudur, yine mekanik susuzlandırmayla giderilebilir. Moleküler su ise kömüre kimyasal olarak bağlıdır, miktarı azdır ve mekanik yöntemlerle susuzlandırılamaz.

Kömür-su arayüzeyinde kapilar kuvvetlerle belirlenen bir miktar su bulunur. Kapilar kuvvetin büyüklüğü sıvının yüzey gerilimiyle belirlenir. Uygulanan kuvvetler (vakum, basınç, santrifüj veya gravite) kapilar kuvvetlerden küçükse susuzlandırma gerçekleşmez ve bu durum kapilar durum olarak adlandırılır; büyükse hava ile su yer değiştirir ve föniküler durumda susuzlandırma gerçekleşir. Bu durum Şekil 2.12'de özetlenmiştir.



Şekil 2.12 : Filtrasyon basıncına bağlı olarak değişen kek nemi.

Kül içeriği yüksek malzemeler, temiz malzemelere göre daha yüksek nemli kek verebilmekte ve susuzlandırma kinetiği de daha yavaş olabilmektedir. Bu sonuçlardan; daha düşük nemli bir ürün alabilmek için malzemenin temizlenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Flotasyon kömürün kül ve kükürt içeriğini düşürdüğü gibi tanelerin yüzeyini kollektörler ile daha az ıslanabilir (hidrofobik) hale getirmektedir. Bu nedenle filtrasyon öncesi flotasyon yapmak daha düşük nemli malzeme üretmek açısından önerilmektedir.

İnce boyutlu taneler (veya yüksek yüzey alanına sahip tanelerin) kek içerisinde daha düşük çaplı kapiler tüpler oluşturur ve bu tüpler daha fazla su tutarak kekin susuzlandırmaya karşı direncini arttırır. Bunun sonucu olarak da, filtrasyon işlemleri (vakum, basınç, santrifüj) sonucu elde edilen kekin nem içeriği oldukça fazla olabilmektedir. Bunun aksine iri taneler kek içerisinde daha büyük kapiler tüpler yaratarak nemin bu tüplerden kolaylıkla akmasını sağlar ve kabul edilebilir nem içerikli kek (yaklaşık %6) kolaylıkla üretilebilir.

Filtrasyonda önemli parametreler pH değişimi, kimyasal miktarı, zaman, tane boyutu, proses suyu kalitesi, kek kalınlığı, uygulanan kuvvetler, kül içeriği ve yüzey oksidasyonudur.

2.3.2 Filtrasyon reaktifleri

Yarıçapı r olan bir kapiler tüpten suyu gidermek için uygulanan basıncın p kapiler basıncından yüksek olması gerekmektedir. Bu durum Laplace eşitliğiyle açıklanmıştır:

$$p = \frac{2\gamma_{23}\cos\theta}{r} \quad (2.5)$$

Formüldeki γ_{23} sıvının yüzey gerilimini, θ ise temas açısını göstermektedir. Sürfaktan ilavesi sıvının yüzey gerilimini düşürür. Bu da sabit basınçta daha ince kapiler tüplerden de suyun giderilmesini mümkün kılmakta ve filtrasyonu iyileştirmektedir. Bazı sürfaktanlar ayrıca kömür yüzeyine adsorplanıp kömürü daha hidrofob hale getirmekte ve böylece su ile havanın yer değiştirmesi kolaylaşmaktadır.

Sürfaktanlar anyonik, katyonik veya noniyonik yapıda olabilmektedir. Genelde 0,25-2,5 kg/ton arasında kullanılırlar, doz aşımında ise yönelme tersine gerçekleşmekte

çift tabaka oluşmakta ve daha fazla suyu bünyede tutup filtrasyonu olumsuz etkilemektedirler. Susuzlandırmada en sık kullanılanları sülfosaksinat, sodyum dodesil sülfat, dimetilaminobenzaldehit'tir (Singh, 1997).

Filtrasyonda katı-su ayrımını hızlandırmak için sürfaktan ilavesinden önce polimer flokülasyonu birçok çalışmaya konu olmuştur. Flokülasyon sağlama amacıyla kullanılan polimerler uzun lineer zincirli suda çözünen poliakrilamid türevleri olup taneler arası köprü vazifesi görerek floklar oluşturur. Floklardan oluşan sistemin kapiler basıncı daha düşük olduğundan filtrasyon direnci de düşük olmaktadır. Flokülanların gereğinden büyük floklar oluşturması, boşluklarda su hapsetmeleri ve filtrasyonu negatif etkilemeleri açısından istenmeyen bir durumdur. Yüksek kesme kuvvetlerinin etkin olduğu santrifüj ve hiperbarik filtrasyonda flokların bozulması sebebiyle etkileri düşüktür (Alam vd., 2011).

Katyonik (CTAB, Cetyl trimethylammonium bromide), anyonik (SLS, Sodium Lauryl Sulfate) ve noniyonik (Triton X-100) sürfaktanların vakum filtrasyona etkisinin karşılaştırıldığı bir çalışmada (Singh vd., 1998) susuzlandırmada etkili olan mekanizmanın sürfaktanların yüzey gerilimini düşürmesinin değil, kömür yüzeyine adsorbe olarak ıslanabilirliğini değiştirmesi olarak açıklanmıştır. Bütün sürfaktanlarda en düşük kek nemine sıfır yük noktasına denk gelen pH aralığında ulaşılrken, en iyi sonuç katyonik sürfaktanla elde edilmiştir. Yüzey gerilimini en çok düşüren noniyonik sürfaktan kek nemini diğerleri kadar düşürememiştir. Bunun yanında bütün sürfaktanlar kritik misel konsantrasyonundan sonra kek neminin hızla yükselmesine ve filtrasyon hızının düşmesine sebep olmuştur. Belli bir konsantrasyon değerinden sonra katyonik sürfaktan kömür tanelerini disperse ettiğinden filtrasyon verimsizleşmektedir.

2.3.3 Filtrasyon teorisi

Tanelerin susuzlandırılmasında dikkate alınan genel görüş kekin pek çok kapiler tüplerden oluştuğu ve suyun bu tüpler içerisinden geçerek keki terk ettiği yönündedir. Poiseuille teorisine (1846) göre suyun kapiler tüp içerisinden akış hızı aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir (3.1).

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8 \mu L} \quad (2.6)$$

Formüldeki dV/dt (veya Q) zamana göre hacimsel akısı, r kapılar tüpün yarı çapını, ΔP kek yüzeyine uygulanan basıncı, L kek kalınlığını ve μ ise suyun viskozitesini vermektedir.

10 yıl sonra Darcy'nin suyun kekten akışı ile ilgili ortaya attığı teoriye göre, su ince tanelerin oluşturduğu kek ve filtre bezinden laminar bir şekilde akarak keki terk etmektedir. Bu düşünce doğrultusunda suyun akış hızı aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{K\Delta P A}{\mu L} \quad (2.7)$$

Eşitlikte A filtre yüzey alanını, K ise kekin geçirgenliğine bağlı bir katsayıyı gösterir. Eşitlik daha basit olarak aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir.

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P A}{\mu(R + R_k)} \quad (2.8)$$

Bu eşitlikte R ortamın direnci olup sabittir. R_k ise kek direncidir ve kek kalınlığı arttıkça artar. Kek direncinin beslenen birim kek ağırlığıyla doğru orantılı olduğu kabul edilirse $R = \alpha w$ olur. Burada α spesifik kek direnci, w de birim alana düşen kek ağırlığıdır (Tao vd., 2003).

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P A^2}{\mu(RA + \alpha V)} \quad (2.9)$$

İntegre edilerek parabolik filtrasyon eğrisi olarak adlandırılan aşağıdaki forma dönüştürülmüştür. Filtrat akış hızına gösterilen direnç kekin spesifik direnci ile ortamın direncinin toplamına eşittir.

$$\frac{t}{V} = \frac{\alpha \mu c}{2A^2 \Delta P} V + \frac{R\mu}{A\Delta P} \quad (2.10)$$

t/V ile V 'nin grafiği lineer olup, eğimden α , y eksenini kestiği noktadan da R değeri bulunur. Bu eşitlikte gösterilen K değeri Kozeny tarafından geliştirilerek aşağıdaki forma dönüştürülmüştür. Kekin geçirgenliği arttıkça spesifik kek direnci düşer.

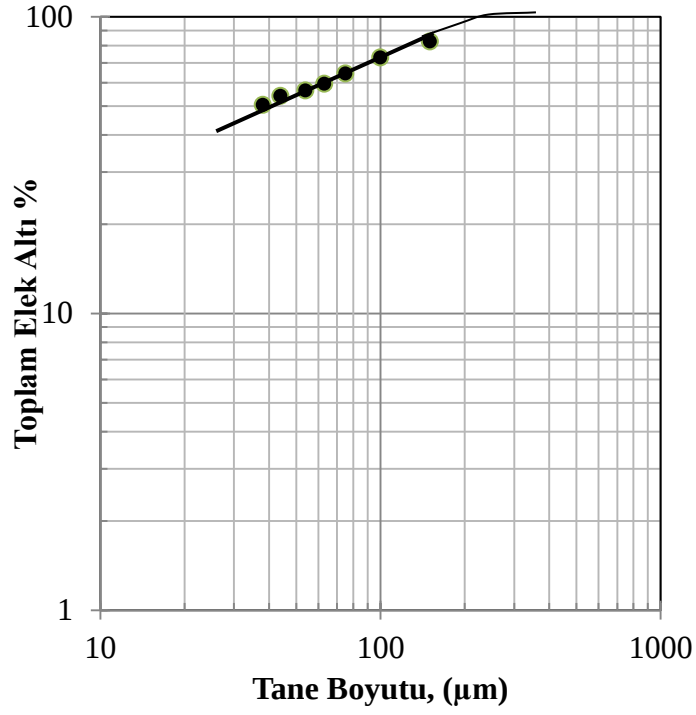
$$K = \frac{\varepsilon^3}{S^2 k (1 - \varepsilon)^2} = \frac{1}{\alpha} \quad (2.11)$$

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

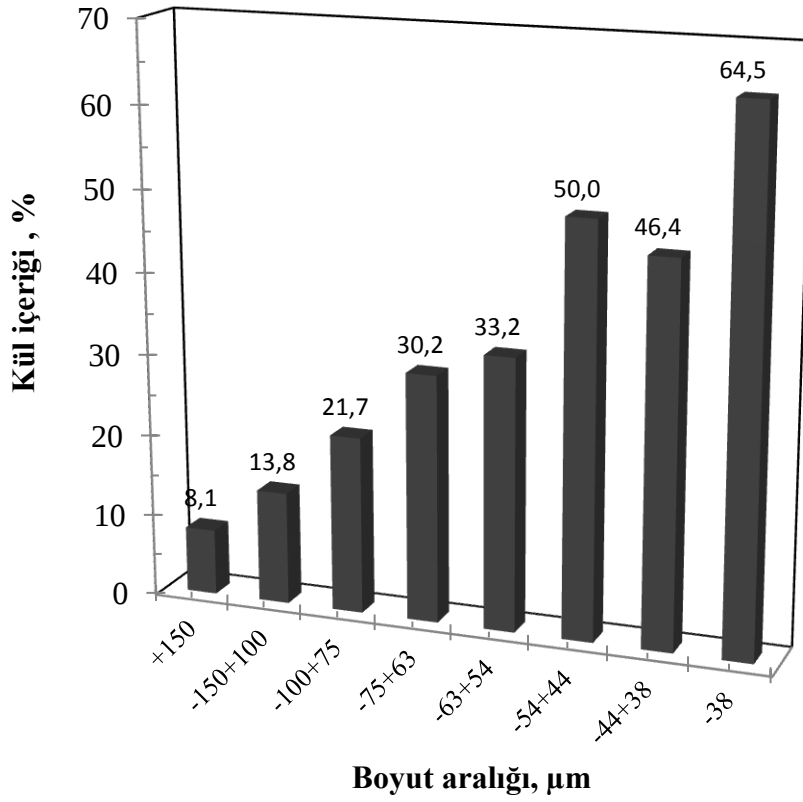
3.1 Malzeme ve Yöntem

3.1.1 Kömür numunesinin elek analizi ve değerlendirmesi

Deneylerde kullanılan numune, Zonguldak bölgesindeki DEKA firmasına ait kömür lavvarında yıkanmakta olan kömürün -0,2 mm fraksiyonunu oluşturmaktadır. +1 mm kömür ağır ortam ayırıcılarıyla yıkanırken, ağır ortam öncesi yaş elemeye ayrılan ve ağır ortam ayırmasına girmeden siklon vasıtasıyla -1+0,2 mm ve -0,2 mm olan ayrılan fraksiyonlardan -1+0,2 mm boyut fraksiyonu spiral ile yıkanmakta, -0,2 mm boyutlu kömür fraksiyonu ise doğrudan tikinerlerde çöktürülmekte, susuzlandırılmakta ve tonu 85 TL'den satılmaktadır. Deneysel çalışmalarda tesis bazında değerlendirilmeyen, siklonüstü -0,2 mm boyutlu, %42 katı oranlı bitümlü kömür şlamı kullanılmıştır. Numunenin külü %42,8'dir. Numune üzerindeki gözlemler minerallerin yaklaşık olarak %95'inin kaolinit ve illit tipi kil minerallerden, yaklaşık %5'inin ise kuvars, kalsit ve piritten oluştuğunu göstermiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunenin elek analizi yapılmış ve elek altı eğrisi Şekil 3.1' de sunulmuştur. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunenin d_{50} boyutunun 38 μm , d_{80} boyutunun ise 120 μm civarında olduğu görülmektedir. Bununla birlikte her bir fraksiyonun kül içeriği Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Malzemenin %50 sini oluşturan -38 μm boyutundaki kömürün kül içeriği %64'tür. Fraksiyonel elek analiz sonuçları, kömür numunesindeki kül yapıcı maddelerden kil grubunun bu boyut fraksiyonunda toplandığını göstermektedir. Çeşitli boyutlarda eleme yapılarak, boyuta göre ayırma ile herhangi bir zenginleştirmenin ya da diğer bir deyişle kül uzaklaştırmanın mümkün olup olmayacağı konusunda, fraksiyonel elek altı miktar ve kül dengeleri temel alınarak, farklı kesme/eleme boyutlarında ürünlerin (3.2), (3.3) ve (3.4) numaralı denklemlerde anlatıldığı gibi yanabilir verim, kül uzaklaştırma verimi ve ayırma etkinlikleri hesaplanmıştır. Bu değerler Çizelge 3.1'de özetlenmiştir. En yüksek ayırma verimi 53 μm 'dan kesme yapıldığında elde edilmektedir. Zenginleştirme yapılmadan sadece bir siklon vasıtasıyla boyuta göre ayırma yapılması durumunda elde edilecek en yüksek ayırma verimi %46,8 olacaktır.



Şekil 3.1 Deneylerde kullanılan taşkömürü numunesinin elek altı eğrisi



Şekil 3.2 : Deneylerde kullanılan kömür numunesinin herbir boyut aralığındaki kül içerikleri

Çizelge 3.1 Çeşitli kesme boyutlarında elde edilen ürünlerin ayırma etkinlikleri

Kesme Boyutu μm		Miktar %	Kül %	Yanabilir Verim %	Kül Uzaklaştırma Verimi %	Ayırma Etkinliği %
100	+	27.0	10.12	42.2	93.57	35.8
	-	73.0	54.46			
	Toplam	100.0	42.49			
75	+	35.6	12.86	53.9		43.1
	-	64.4	58.84		89.22	
	Toplam	100.0	42.47			
63	+	40.5	14.96	59.9		45.6
	-	59.5	61.2		85.73	
	Toplam	100.0	42.47			
53	+	43.6	16.26	63.5		46.8
	-	56.4	62.73		83.31	
	Toplam	100.0	42.47			
45	+	45.9	17.97	65.5		46.0
	-	54.1	63.27		80.58	
	Toplam	100.0	42.48			
38	+	49.5	20.04	68.8		45.5
	-	50.5	64.48		76.65	
	Toplam	100.0	42.48			

3.1.2 Deneylerde kullanılan reaktifler

Deneylerde özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiş olan farklı hidrofilik-lipofilik denge değerlerinde (4,9-18,4) fenol tipi non-iyonik sürfaktanların ve flotasyon ile zenginleştirmede ayırma performansları araştırılmıştır. Bunun yanında sözü geçen sürfaktanların su taşıma ve susuzlandırma karakteristikleri de incelenmiştir. Optimum sürfaktan miktarıyla istenen kül miktarına getirilen flotasyon ürünleri filtrasyona tabi tutulmuştur. Karşılaştırma amaçlı konvansiyonel yağlı kollektörlerden motorin ve kerosen de aynı işlemlerde kullanılmıştır. Köpürtücü olarak ise MIBC (metil izobutil karbinol) kullanılmıştır.

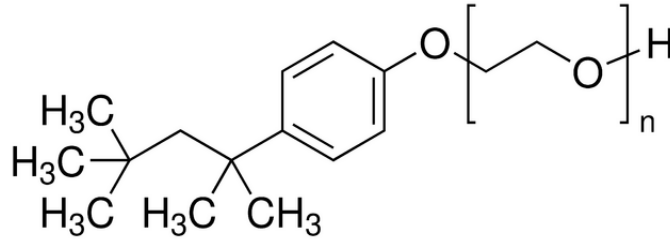
Çizelge 3.2 : Deneylerde kullanılan noniyonik sürfaktanların kimyasal özellikleri.

Noniyonik sürfaktan çeşidi	HLB değeri	CMC ppm,25° C	Bulanma Noktası °C, %1	X değeri ort	pH, %5 çözelti	Özgül ağırlık 25°C , g/mL	Yüzey gerilimi din/cm (%1) 25°C
Triton™ X-15	4,9	çözünmez	çözünmez	1,5	7,1	0,989	çözünmez
Triton™ X-45	9,8	136	dağılabilir	4,5	6	1,031	29
Triton™ X-114	12,4	120	25	7,5	6	1,052	31
Triton™ X-100	13,4	189	66	9,5	6	1,061	33
Triton™ X-102	14,4	267	88	12	8,8	1,070	36
Triton™ X-165	15,5	570	>100	16	8,8	1,076	39
Triton™ X-305	17,3	1916	>100	30	7	1,092	49
Triton™ X-705	18,4	3585	>100	55	7	1,100	44

Dow Company verileri (t.y.)

Deneylerde kullanılan 8 adet Triton-X serisi sürfaktan Sigma Aldrich Chemicals'dan temin edilmiştir. Bu non-iyonik sürfaktanlar değişik uzunlukta etilenoksit zincirinin 3-oktilfenol etoksilata tutunmasıyla oluşmuştur. 4-(1,1,3,3-Tetrametilbütil) fenil-polietilen glikol veya polietilen glikol 4-tert-oktilfenil eter olarak da adlandırılırlar. Triton-X tipi noniyonik sürfaktanların kimyasal formülü Şekil 3.3'te görülmektedir. Kuyruk kısmı hidrofobik olup bu hidrofobik zincirdeki alkil grubun hidrokarbon zincirde 8 adet karbon atomu vardır. Baş kısmındaki hidrofilik etilen oksit zincirinin uzunluğu X ile ifade edilir (Hassas, 2013). Bu reaktiflerde kuyruk sabit kalıp baş kısmının uzunluğu değişmektedir. Hidrofil zincir büyüdükçe HLB değeri de artar ve reaktifin lipofilliği azalır. 8 adet sürfaktanın değişen X değerlerine göre kimyasal özellikleri çizelge 3.2'de verilmiştir. HLB değeri 10'dan düşük olan sürfaktanlar suda çözünmez veya az çözünürler.

Viskozitesi 2,64 cSt olan motorinin yoğunluğu 0,84 g/cm³'tür. Kerosenin viskozitesi ise 1,50 cSt olup yoğunluğu 0,78 g/cm³'tür. İki kollektör de emülsifiye edilmeden kullanılmıştır. X-15 sürfaktanı suda çözünmediğinden, flotasyon hücresi içerisinde homojen bir kollektör dağılımı sağlanması açısından %50 etil alkol içeren çözeltide hazırlanmıştır.



Şekil 3.3 : Triton X tipi noniyonik sürfaktanların (oktilfenol etoksilat) kimyasal formülü.

3.1.3 Deneylerde kullanılan ekipmanlar ve yöntem

3.1.3.1 Flotasyon deneyleri ve gang taşıma karakteristiklerinin belirlenmesi

Noniyonik sürfaktanların bitümlü kömür şlamı üzerinde flotasyon performansını belirleme amaçlı yapılan çalışmalar Şekil 3.4'te görülen laboratuvar tipi Denver flotasyon makinasında 1,2 litrelik hücre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 200 gr bitümlü şlam kömür numunesi kullanılarak pülpte katı oranı %15 olacak şekilde

alışılmıştır. Deneyler pH düzenlemesi yapılmadan, 1200 rpm karıştıracı hızında gerçekleştirilmiştir. Kollektör ilavesiyle kondisyon süresi 3 dakika olup, köpürtücü ilave edildikten sonra 1 dakika daha kondisyon devam etmiştir. Daha sonra hücreye hava verilerek belirli zaman aralıklarında (0.5 dak, 1 dak, 2 dak, 3 dak, 4 dak) köpük toplanmıştır. Farklı zaman aralıklarında farklı tavalara toplanan konsantre plpleri tartılmıştır. rnler sabit tartıma gelene kadar etüvde 105°C’de 1 gün tutularak kurutularak tekrar tartılmıştır. Böylece her bir zaman aralığında konsantrede toplanan hem katı hem su miktarı hesaplanmıştır. Numunelere daha sonra kül analizi yapılmıştır. Mekanik taşınma derecesi Warren (1985) metoduyla saptanmıştır.



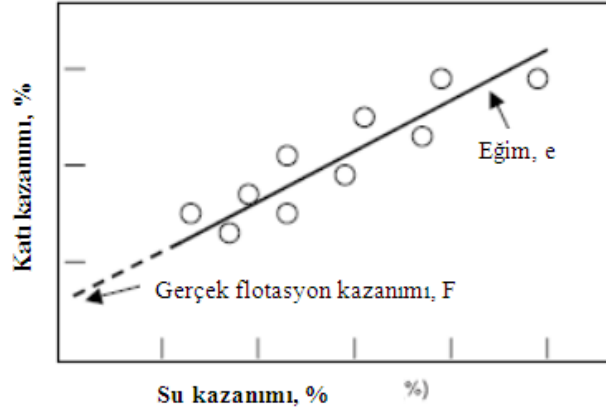
şekil 3.4 : Deneylerde kullanılan laboratuvar tipi Denver flotasyon makinesi.

Warren metoduna göre yapılan mekanik taşınma kabulünde kuru köpükte taşınma olmadığı, sadece gerçek flotasyon olduğu varsayılır. Bir dizi flotasyon deneyi gerçekleştirildikten sonra toplam katı kazanımı ve toplam su kazanımı grafiği çizilerek regresyonu alınır ve sıfır su kazanımı noktasındaki katı kazanımı değeri gerçek flotasyonla kazanılan miktarı verir. Metod aşağıdaki denklemle özetlenmiştir:

$$R(t) = F + eW(t) \quad (3.1)$$

Burada $R(t)$ ve $W(t)$ sırasıyla katı ve sıvı kazanım miktarlarının zamana bağlı değişimini, F gerçek (seçimli) flotasyonla kazanım miktarını göstermektedir.

Mekanik taşınma faktörü e , $R(t)$ 'nin $W(t)$ 'ye grafiğinin eğimidir. Warren metodunun şematik gösterimi Şekil 3.5'de sunulmuştur.



Şekil 3.5 : Warren metoduyla mekanik gang taşınma miktarının belirlenmesi (George vd., 2004)

3.1.3.2 Flotasyon performansının değerlendirilmesi

Söz konusu kollektörlerle gerçekleştirilen flotasyon çalışmaları sonuçlarının değerlendirilebilmesi için ürünlerden örnekler alınarak kül analizleri yapılmıştır. Kül analizleri kuru bazda kömür numuneleri ile yapıldığından, ürünlerin hazırlama işlemleri devam ederken bekleme süresinde kaptıkları nemlerinden, 100° C sabit sıcaklıkta 30 dakika etüvde kalarak uzaklaştırılmaları sağlanmıştır. Sonrasında özel seramik krozelere 0,5-1 gr arasında alınan numuneler 825°C sıcaklıktaki fırında 4 saat bekletilmiştir. Fırın içerisinde yanabilen organik kısım uzaklaşmakta, kömür dışı safsızlıklar olan inorganik maddeler ise kül kısmını oluşturmaktadır. Fırında yakma öncesi ve sonrası bilinen malzeme miktarlarına göre ürünlerin % kül içerikleri belirlenmiştir. Son aşamada ise, beslenen malzeme ve ürünlerin miktar ve külleri bilindiği için yanabilir verim, kül uzaklaştırma verimi ve ayırma etkinliği değerleri aşağıda verilen formüller yardımı ile deneylerin performans değerlendirmeleri yapılmıştır.

$$\text{Yanabilir Verim \%} = \frac{K \times (100 - k)}{B \times (100 - b)} \quad (3.2)$$

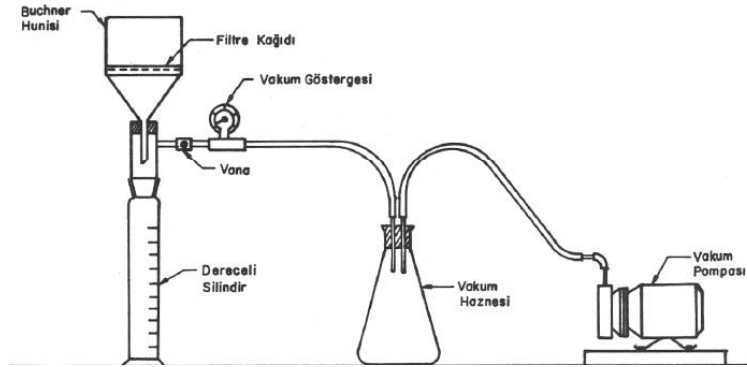
$$\text{Kül Uzaklaştırma Verimi \%} = \frac{A \times a}{B \times b} \quad (3.3)$$

$$\text{Ayırma Etkinliği (\%)} = YV(\%) - (100 - KUV \%) \quad (3.4)$$

K=Lave miktarı,%, k =Lave külü,%, A=Şist miktarı,%, a =Şist külü,%, B=Beslenen miktar,%, b=Beslenen malzeme külü,%'dür. AE ayırma etkinliği, YV yanabilir verim, KUV kül uzaklaştırma verimi yerine kullanılmıştır. Yanabilir verim beslenen kömürdeki yanabilir kısmın ne kadarının konsantreye taşındığını ifade eder. Kül uzaklaştırma verimi beslenen malzemedeki kül içeriğinin ne kadarının şistte kaldığının bir ifadesidir. Ayırma etkinliği ise ikisinin bir fonksiyonu olup konsantre kalitesini değerlendirmede daha etkin bir parametredir.

3.1.3.3 Susuzlandırma karakteristiklerinin belirlenmesi

Susuzlandırma çalışmaları; çeşitli noniyonik sürfaktanların kollektör olarak kullanıldığı flotasyon çalışmaları sonucunda elde edilen, susuzlandırılması yapılmayan ürünlerin filtrasyon kinetiğini incelemek üzere Büchner vakum filtrasyon düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Maksimum vakum basıncı 0,8 bar (80 kPa) olup kekin oluştuğu Büchner hunisinin çapı 10,2 cm'dir. Deney düzeneği Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.6 : Büchner vakum filtrasyon düzeneği

Vakum sırasında oluşan filtrat (filtre suyu) hacmini ölçmek için sisteme bir cam mezür eklenmiştir. Filtrasyon işlemlerine başlamadan önce, pülpte katı oranı yaklaşık %25 civarında olan flotasyon ürünü manyetik karıştırıcıda 10 dakika karıştırılarak homojen bir pülp elde edilmiştir. Pülp 300 ml'lik beherden filtrasyon kabı içerisine dökülerek filtre cihazı çalıştırılmış ve susuzlandırma işlemi boyunca her 10 saniyede bir mezürdeki filtrat hacmi kaydedilmiştir. Kaydetme periyodu ikinci dakikadan sonra 30 saniyeye çıkarılmış ve 360 saniye boyunca kaydetme işlemi devam etmiştir.

Bu süre zarfında bütün numunelerde filtrat hacmindeki değişim sabitlenmiştir. Deneyler sonucu elde edilen kek alüminyum kap içerisinde tartılarak 105 °C deki etüve konulmuş, denge ağırlığına gelene kadar burada tutulmuş ve tekrar tartılarak kekin nem içerikleri belirlenmiştir. Nem değeri aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$\text{Kek nemi (\%ağ)} = \frac{\text{yaş ağırlık} - \text{kuru ağırlık}}{\text{yaş ağırlık}} \times 100 \quad (3.5)$$

Darcy eşitliğinden yola çıkılarak türetilmiş olan parabolik filtrasyon denklemi basitleştirilmiş denklemdeki gibi yazılabilir:

$$\frac{t}{V} = bV + a \quad (3.6)$$

t filtrasyon süresini, V ise filtrat hacmini ifade etmektedir. Bu denklem filtrasyon kinetiğinin temel parametreleri olan spesifik kek direnci ve filtre ortamı direnci hesaplamalarında kullanılmıştır. t/V'nin V'ye karşılık çizilmesiyle elde edilecek doğrunun eğimi b'ye, doğrunun t/V eksenini kestiği nokta ise a'ya eşittir.

$$a = \frac{R\mu}{A\Delta P} \quad (3.7)$$

$$b = \frac{\alpha\mu c}{2A^2\Delta P} \quad (3.8)$$

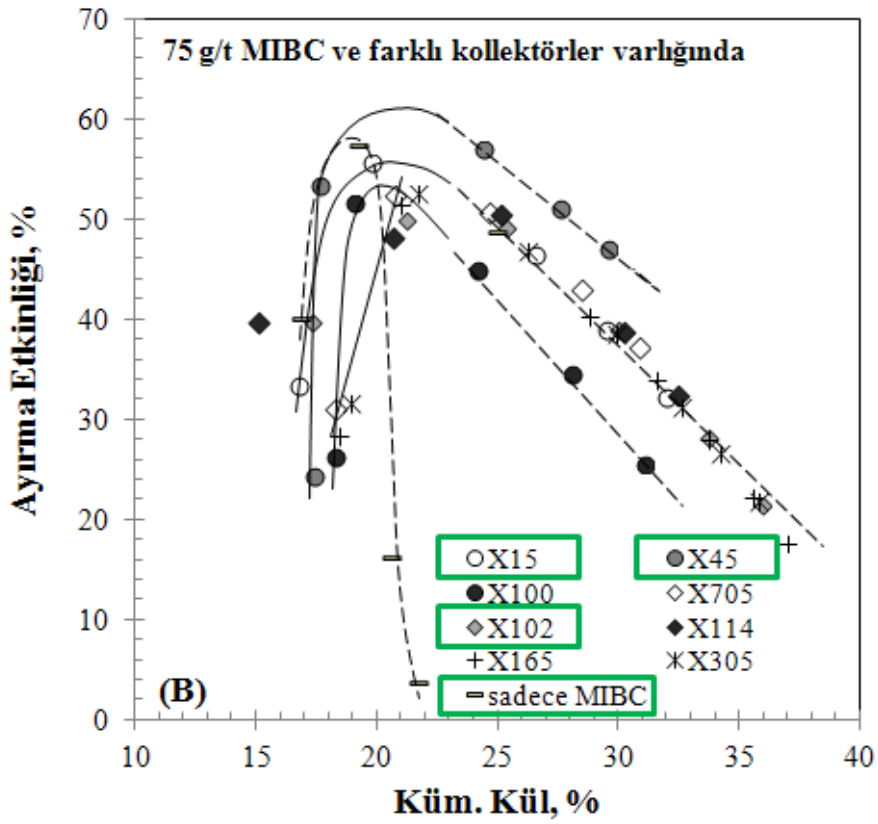
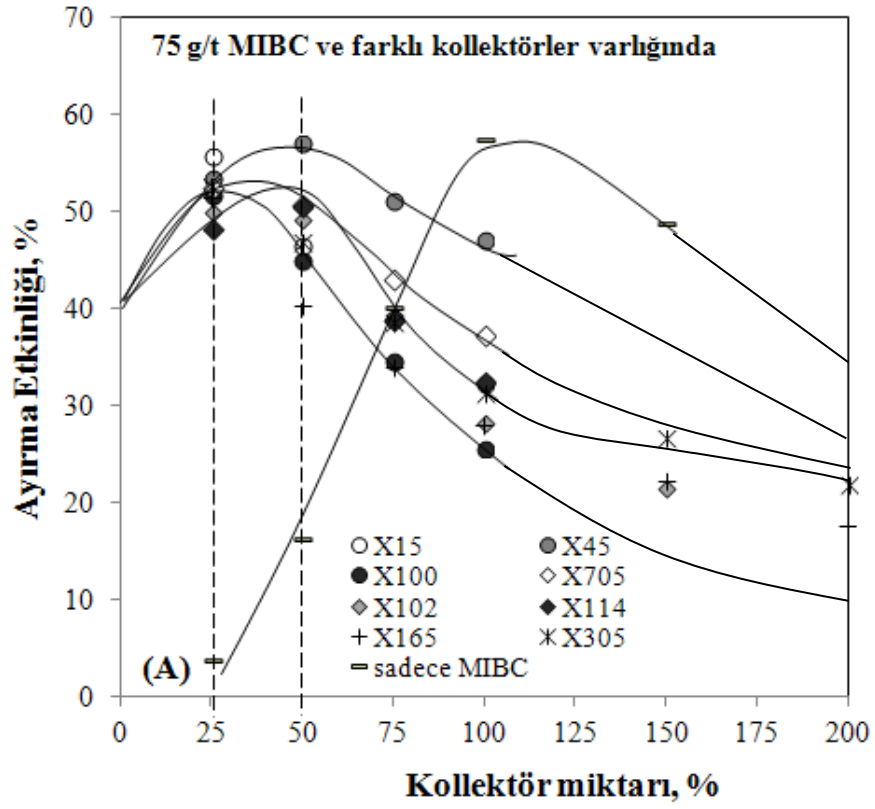
a ve b değerleri ile filtrasyon hunisinin alanı $A = 0,03266856 \text{ m}^2$, suyun viskozitesi $\mu = 0,001 \text{ Ns/m}^2$, tüm deneylerde aynı değerde olan basınç farkı $\Delta P = 40000 \text{ N/m}^2$ olarak denklemde yerine konulduğunda spesifik kek direnci (α) ve ortam direnci (R) hesaplamaları yapılmıştır. Pülpte katı oranı olan c değeri her deney için kg/m^3 cinsinden hesaplanmıştır.

3.2 Deney Sonuçları

3.2.1 Farklı yapıdaki non-iyonik sürfaktanların flotasyon performansları

3.2.1.1 Optimum kollektör miktarının belirlenmesi

Zonguldak bölgesi, Deka Firmasına ait kömür şlamlarının, farklı karakterdeki noniyonik sürfaktanlarla flotasyonunda araştırılan ilk konu etkin sürfaktan konsantrasyonunun saptanması olmuştur.



Şekil 3.7: a)Kollektör miktarına bağlı olarak değişen ayırma etkinlikleri b) kül uzaklaştırma verimine bağlı olarak değişen ayırma etkinlikleri

Bu amaçla deneylerde sabit tutulan 75 g/ton köpürtücü (MIBC) ile birlikte 25-200 g/ton arasındaki sürfaktan miktarları denenmiştir. Artan kollektör miktarına bağlı olarak her bir reaktif için ayırma etkinliğinin değişimi Şekil 3.7’de verilmiştir. Maksimum kül uzaklaştırma verimi her bir reaktif için 50 g/ton reaktif dozajında elde edilmiştir.

Farklı miktarlarda noniyonik sürfaktanlarla yapılan flotasyon deneylerinde düşük miktarda kullanılan sürfaktan kül uzaklaştırma verimini arttırmıştır. Sürfaktan miktarı daha da arttırıldığında hidrofilik olan inorganik maddenin köpüğe karışması da artmakta, (mekanik taşınma /agregatlara hapsolma), dolayısıyla, ayırma etkinliği de kül uzaklaştırma veriminin düşüşüne paralel olarak azalmaktadır. Hidrofilik olan inorganik maddenin köpüğe karışmasının yanısıra, kritik misel konsantrasyonu aşıldığında çift tabaka adsorplanması gerçekleştiğinden sürfaktan kömür yüzeyini daha hidrofil yapmaktadır (Erol vd., 2003).

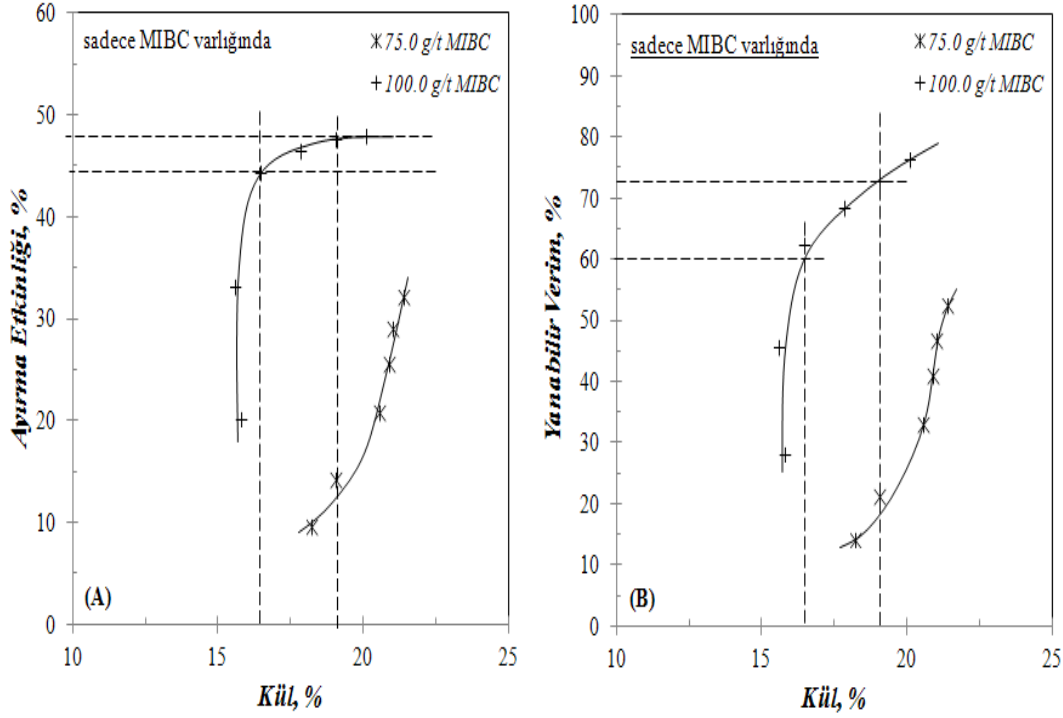
Bu durumda kullanılan Triton-X tipi non-iyonik sürfaktanların kullanılan kömür şlamı için optimum miktarının 50 g/t olduğu saptanmıştır. Bu konsantrasyondan daha yüksek konsantrasyonlarda ayırma etkinliği bütün sürfaktanlar için hızla düşmüştür. Optimum miktarın belirlendiği deneylerde reaktif ilavesi kademeli yapıldığından ve süreye bağlı kalmaksızın köpük alındığından ayırma etkinlikleri bir miktar daha yüksek çıkmıştır.

3.2.2 Optimum köpürtücü miktarının belirlenmesi

3.2.2.1 Sadece MIBC kullanılarak gerçekleştirilen flotasyon deneyleri

Optimum köpürtücü miktarının belirlenmesi amacıyla yapılan deneyler 0, 12.5, 25, 50, 75, 100 g/t miktarlarında MIBC ile kollektör kullanılmadan gerçekleştirilmiştir. 75 g/t miktarından daha düşük köpürtücü dozajlarında stabil köpük elde edilememiştir. Birleşme ve kabarcık patlaması sonucu konsantre toplanamamıştır. 100 g/ton’dan daha yüksek konsantrasyonlarda ise köpürtücü miktarı yine stabil köpük oluşumuna imkan vermemiştir. Sadece MIBC kullanılarak köpük alımının gerçekleştiği 75 g/t ve 100 g/t miktarlarındaki flotasyon sonuçları Şekil 3.8’de görülmektedir. Zaman bağlı olarak (0.5 dak, 1 dak, 2 dak, 3 dak, 4 dak) toplanan konsantrelerin kül içerikleri ve ayırma etkinliği değişimi ile yanabilir verimleri hesaplanmıştır. 100 g/t’da elde edilecek konsantre ayırma etkinliği %48’e, yanabilir

verim ise %78'e kadar çıkmaktadır. 75 g/t köpürtücü miktarı aynı derecede stabil köpük üretmediğinden efektif olmamıştır.



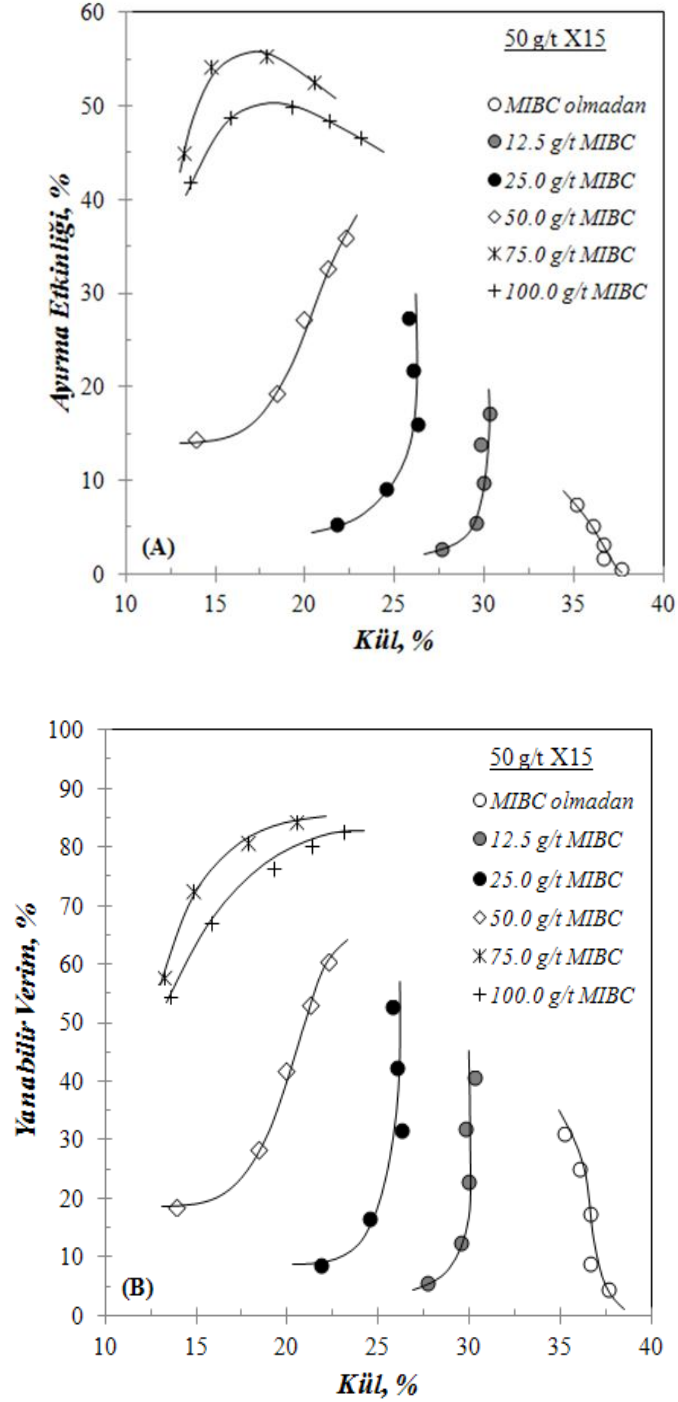
Şekil 3.8 : 75 ve 100 g/t MIBC köpürtücüsü ile gerçekleştirilen flotasyon sonuçları
a) kül içeriğine bağlı olarak değişen ayırma etkinliği b) kül içeriğine bağlı olarak değişen yanabilir verim.

3.2.2.2 Kollektör varlığında optimum köpürtücü miktarının belirlenmesi

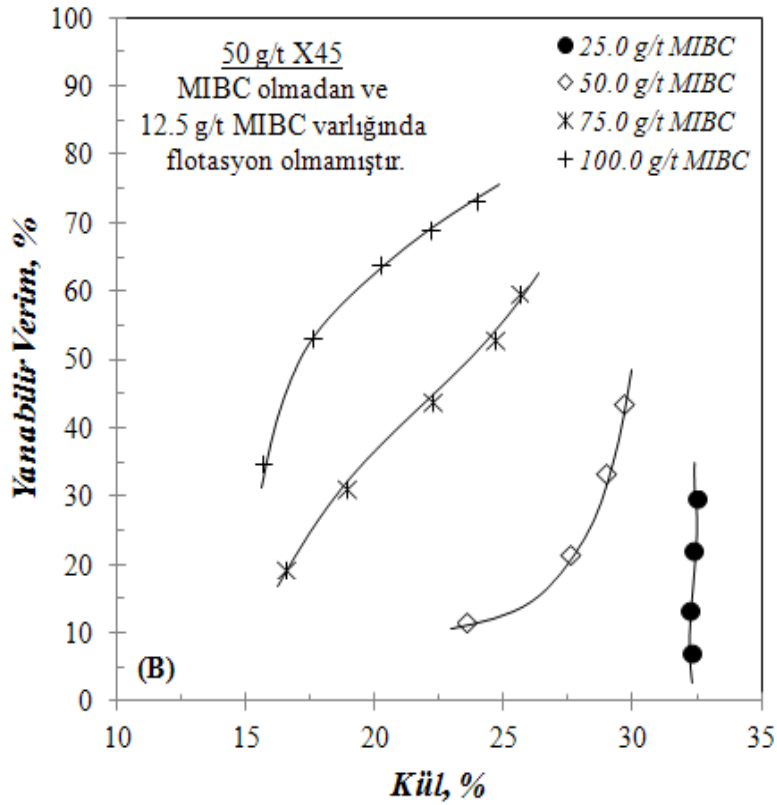
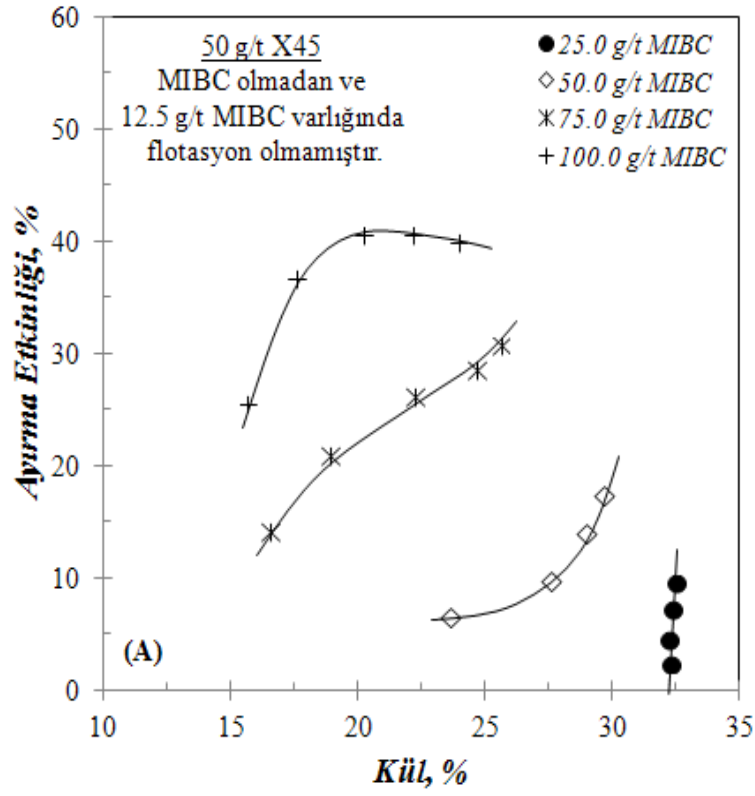
8 adet non-iyonik sürfaktanın optimum konsantrasyonunda (50 g/t) ve 0-12,5-25-50-75-100 g/t arasında değişen MIBC konsantrasyonlarında gerçekleştirilen deneylerle bu sürfaktanların flotasyon performansları belli periyotlarda toplanan konsantrelerin (30-60-120-180-240 sn) kül analizi sonuçlarıyla hesaplanan ayırma etkinliği ve yanabilir verimlerden yola çıkılarak değerlendirilmiştir. Herbir kollektör için optimum köpürtücü miktarının denendiği deney sonuçları Şekil 3.9-3.17'de gösterilmiştir.

HLB değeri en düşük olan Triton X-15 (4,9) ve Triton X-45 (9,8) sürfaktanları lipofilik sürfaktanlar olarak sınıflandırılabilir. Yağ içinde suyu emülsifiye etmede kullanılırlar. Kömürün hidroforik yüzeyine apolar hidroforik zincirleriyle hidroforik bağ yaparak adsorplanırlar. Kömürün oksitli kısımlarına ise hidrofilik baş kısmının yaptığı hidrojen bağlarıyla bağlanabilirler. Flotasyon performanslarının araştırıldığı

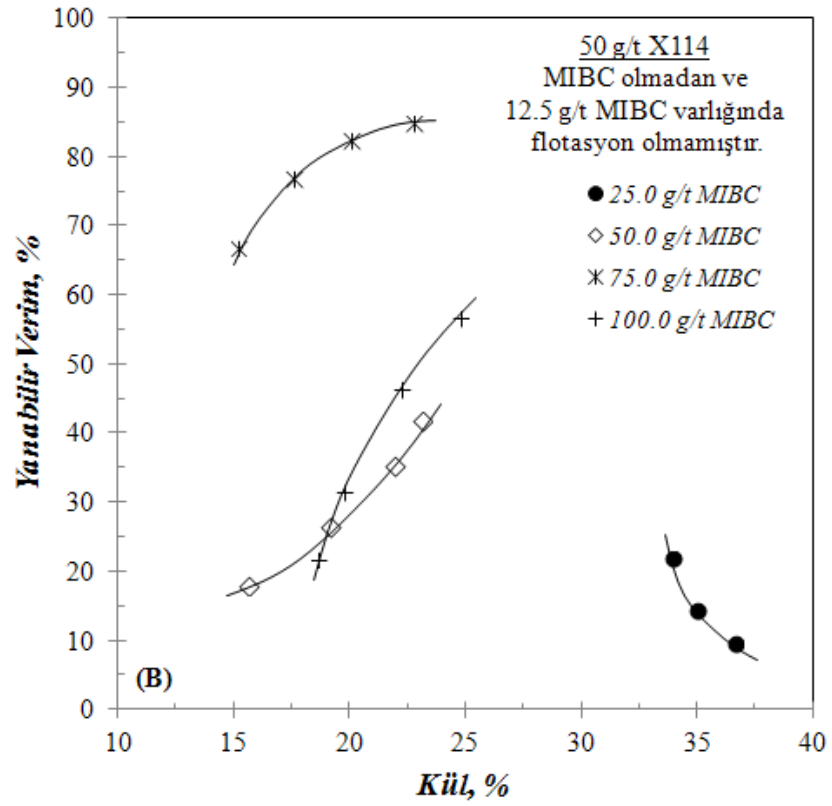
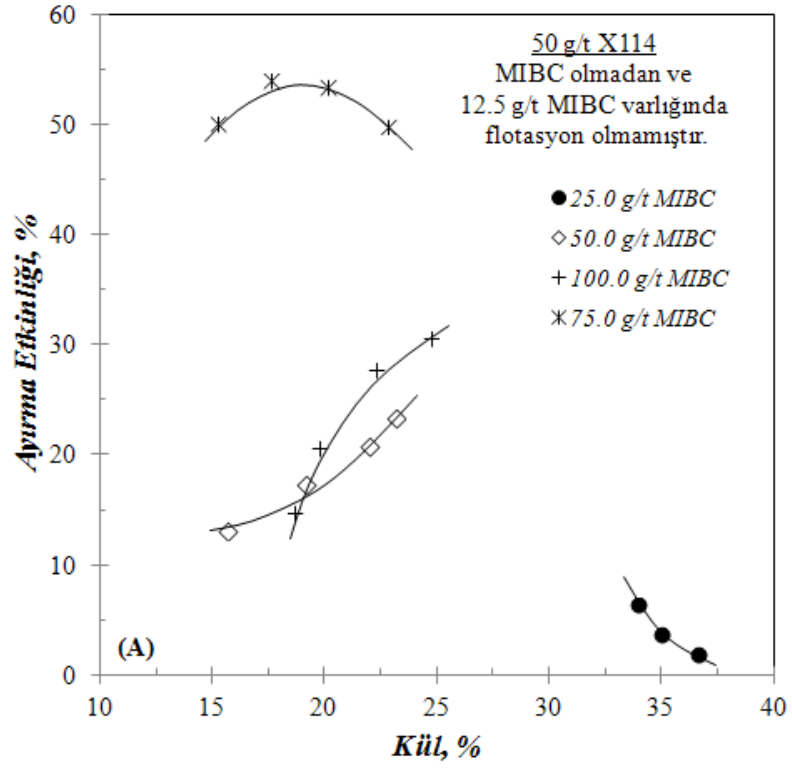
deneylerde daha önceden tespit edilen 50 g/t optimum kollektör konsantrasyonunda değişen miktarlarda MIBC ilavesiyle farklı periyotlarla (0.5 dak, 1 dak, 2 dak, 3 dak, 4 dak) konsantreler elde edilmiştir. Elde edilen ürünlerin kül içerikleriyle ayırma etkinliği ve yanabilir verim grafikleri X-15 için Şekil 3.9'da, X-45 için Şekil 3.10'da görülmektedir.



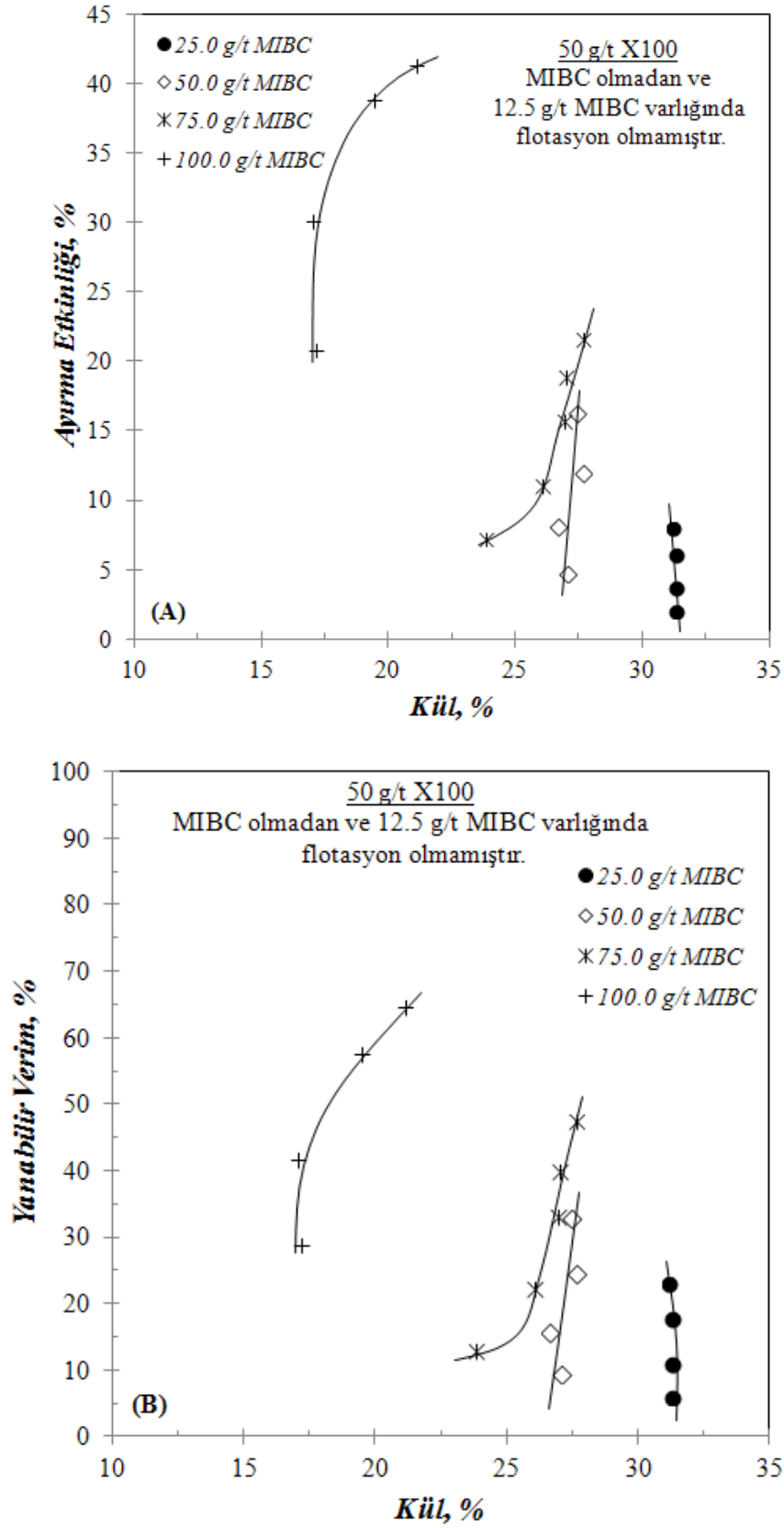
Şekil 3.9 : Triton X-15 kollektörü ile gerçekleştirilen flotasyon sonuçları a) ayırma etkinliği-kül ilişkisi b)yanabilir verim-kül ilişkisi



Şekil 3.10 : Triton X-45 kollektörü ile gerçekleştirilen flotasyon sonuçları a) ayırma etkinliği-kül ilişkisi b)yanabilir verim-kül ilişkisi



Şekil 3.11 : Triton X-114 kollektörü ile gerçekleştirilen flotasyon sonuçları a) ayırma etkinliği-kül ilişkisi b)yanabilir verim-kül ilişkisi



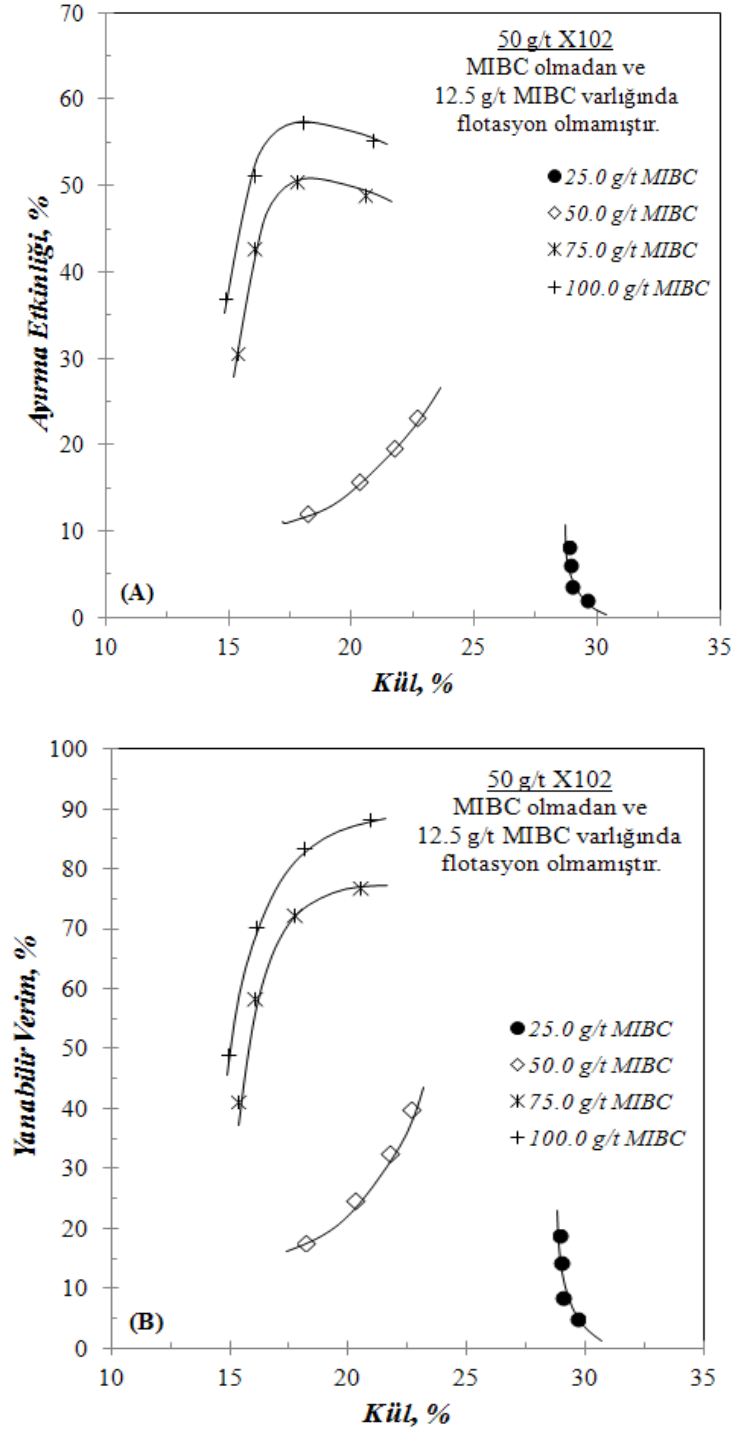
Şekil 3.12 : Triton X-100 kollektörü ile gerçekleştirilen flotasyon sonuçları a) ayırma etkinliği-kül ilişkisi b)yanabilir verim-kül ilişkisi

X-15 sürfaktanı suda çözünmediğinden %50'lik kısa zincirli alkol-su çözücüsünde çözülerek deneylerde kullanılmıştır. Bütün sürfaktanlar içinde en iyi ayırma etkinliği bu sürfaktanla elde edilmiştir. Hidrofilik baş kısmı en kısa olan sürfaktandır. Dow Company verilerine göre kritik misel konsantrasyonu en düşüktür. Köpürtücü kullanılmadığı durumda diğer sürfaktanların aksine flotasyon gerçekleşmiştir, bunun sebebi çözücü olarak kullanılan alkolün köpürtücü görevi görmesidir. En yüksek ayırma verimi 75 g/t köpürtücü miktarında elde edilmiştir. 75 g/t köpürtücü miktarı pülp içerisindeki 10.71 ppm'lik bir konsantrasyona denk gelmektedir ki bu değer kritik birleşme noktasına yakın bir değerdir. Melo ve Laskowski (2006), MIBC için kritik birleşme konsantrasyonunun 11,2 ppm olduğunu ifade etmiştir. Bu miktarda sıkı ve küçük köpük oluşumu gözlenmiştir. Köpürtücü miktarı 100 g/t'a çıkarıldığında daha hareketli ve akışkan bir köpük tabakası elde edilmekte ve bunun sonucunda verim yükselirken elde edilen temiz kömürün kalitesi düşmektedir. Başka bir deyişle, fazla akışkan köpük, mekanik gang taşınımını arttırmakta ve köpürtücü miktarı arttıkça kül giderme başarısı azalmaktadır. Çözeltideki alkol varlığı köpürtücü etkisi yaparak daha düşük MIBC ihtiyacı doğurmuştur. Optimum şartlarda 2 dak köpük alındığında elde edilen en yüksek ayırma etkinliği %55, yanabilir verim %85 olup ürünün kül içeriği %17'dir. Aynı şartlarda 0,5 dak köpük alındığında kül içeriği %13 olup ayırma etkinliği yanabilir verimin düşük olması sebebiyle %45'tir. Köpük alma süresi arttıkça gang kazanımı artmakta ve kül içeriği artmaktadır.

X-45 sürfaktanı ise başka bir çözücüye gerek duyulmadan suda (ağırlıkça %1) hazırlanmıştır. Bu sürfaktanın düşük HLB değeri sebebiyle X-15 sürfaktanına yakın performans göstermesi beklenirken en yüksek ayırma etkinliği 50 g/t sürfaktan 100g/t MIBC ilavesinde %40'ta kalmıştır.

Triton X-114, Triton X-100 ve Triton X-102 sürfaktanları sırasıyla 12,4-13,4-14,4 HLB değerine sahip reaktiflerdir. HLB değeri 11-14 arasında olan sürfaktanlar iyi birer ıslatma ajanıdır. Ayrıca HLB değeri 10'dan yüksek olanlar düşük olanların aksine suda çözünürler. Sürfaktan ilavesiyle flotasyon performansının değişmesi iki etkenden dolayı olur. Birincisi kömür-su arayüzeyine adsorplanan sürfaktan miktarı, ikincisi ise sıvı fazda artakalan sürfaktan miktarıdır (Banford ve Aktaş, 2004). Triton X-100'ün kömür için iyi bir dispersan olduğu bilinmektedir (Aktaş, 2001). Adsorplanma mekanizması da aynı çalışmada açıklanmıştır.

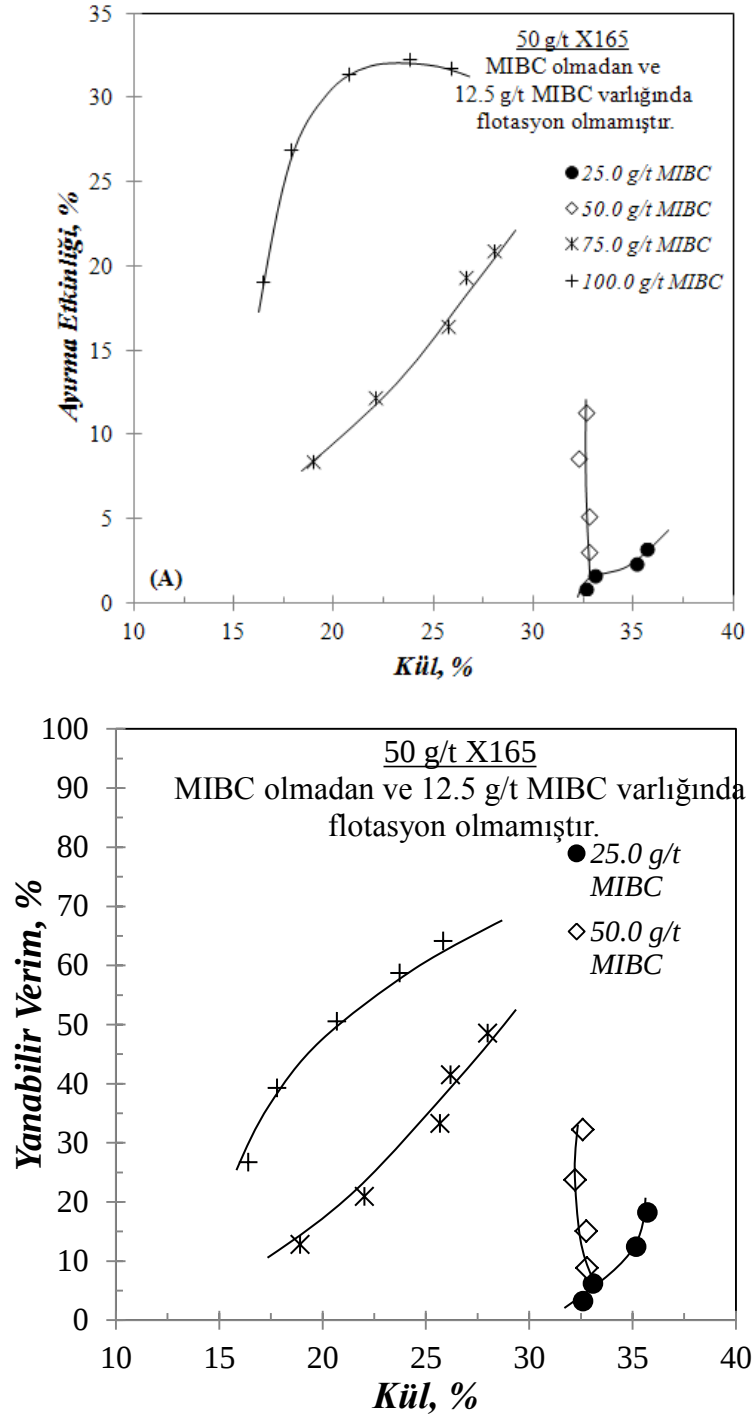
Triton X-114 için en yüksek ayırma verimi 75 g/t köpürtücü miktarında elde edilmiştir. Triton X-15'te gözleendiği gibi bu miktarda sıkı ve küçük köpük oluşumu gözlenmiştir. Köpürtücü miktarı 100 g/t'a çıkarıldığında daha hareketli ve akışkan bir köpük tabakası elde edilmekte ve bunun sonucunda verim yükselirken elde edilen temiz kömürün kalitesi düşmektedir.



Şekil 3.13: Triton X-102 kolektörü ile gerçekleştirilen flotasyon sonuçları a) ayırma etkinliği-kül ilişkisi b)yanabilir verim-kül ilişkisi

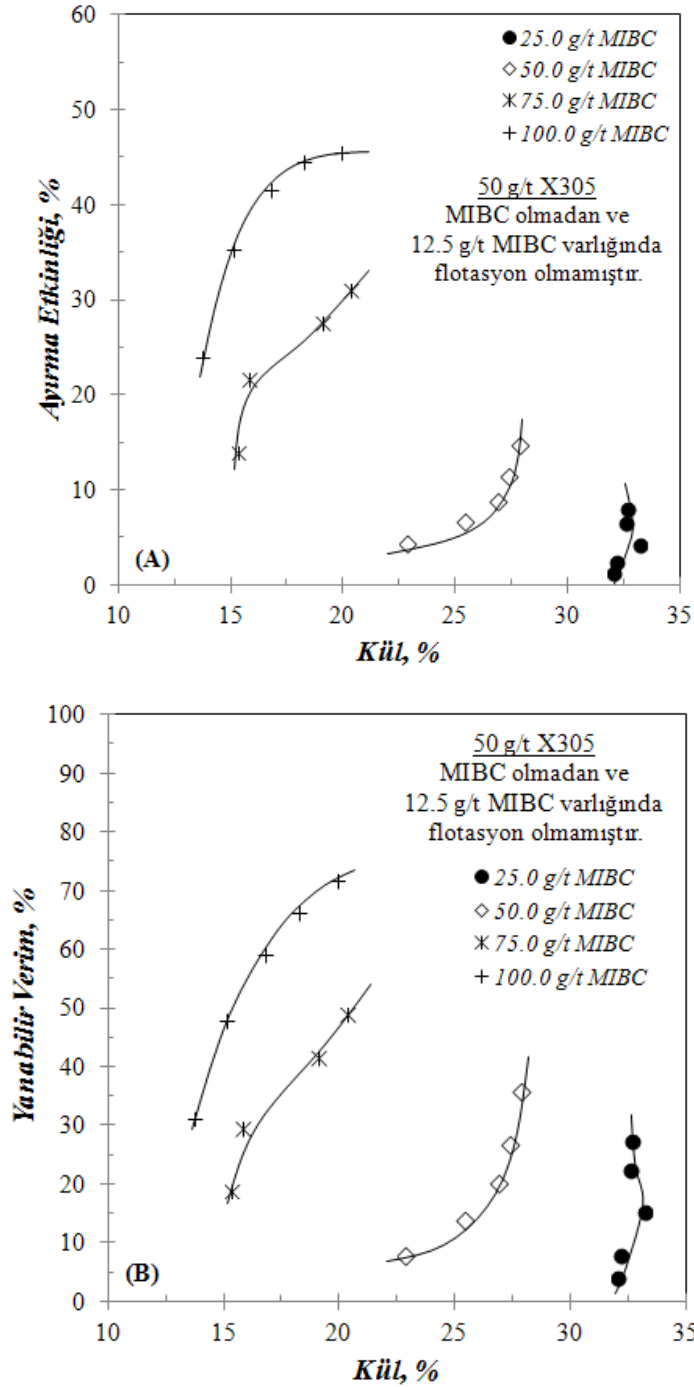
Hidrofilik kısmı kısa HLB değeri yüksek sürfaktanlar olan X-165, X-305 ve X-705 suda en iyi çözünen reaktiflerdir. Deterjan özellik gösterirler.

En düşük flotasyon performansı tüm sürfaktanlar içinde X-165 ile elde edilmiştir. 100 g/t MIBC ile birlikte 50 g/t X-165 %32 ayırma etkinliğinde, %25 kül içeren ürün %58 yanabilir verimle kazanılmıştır.

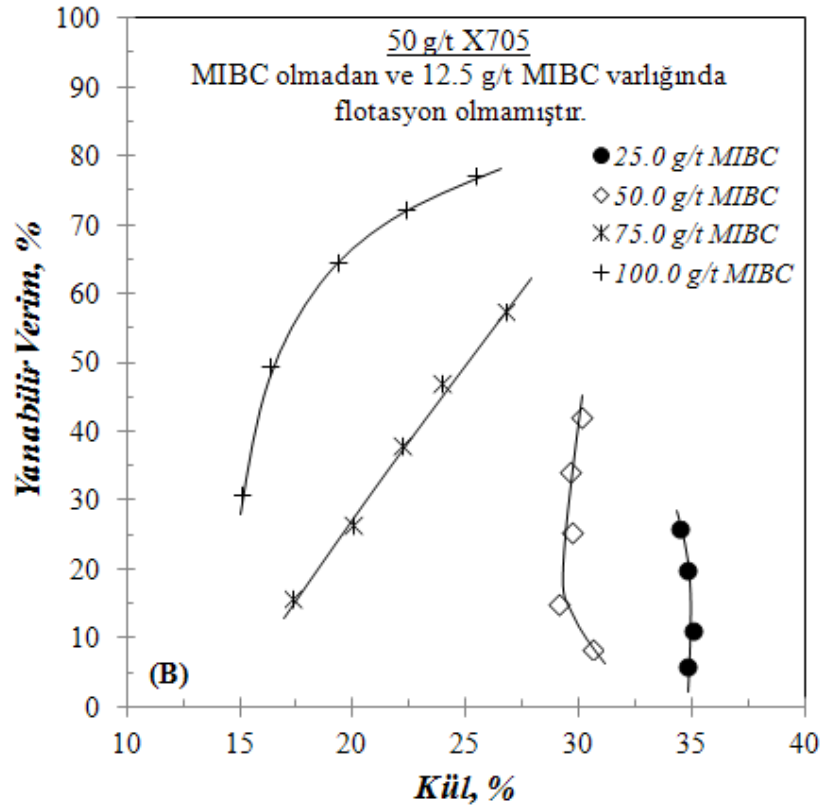
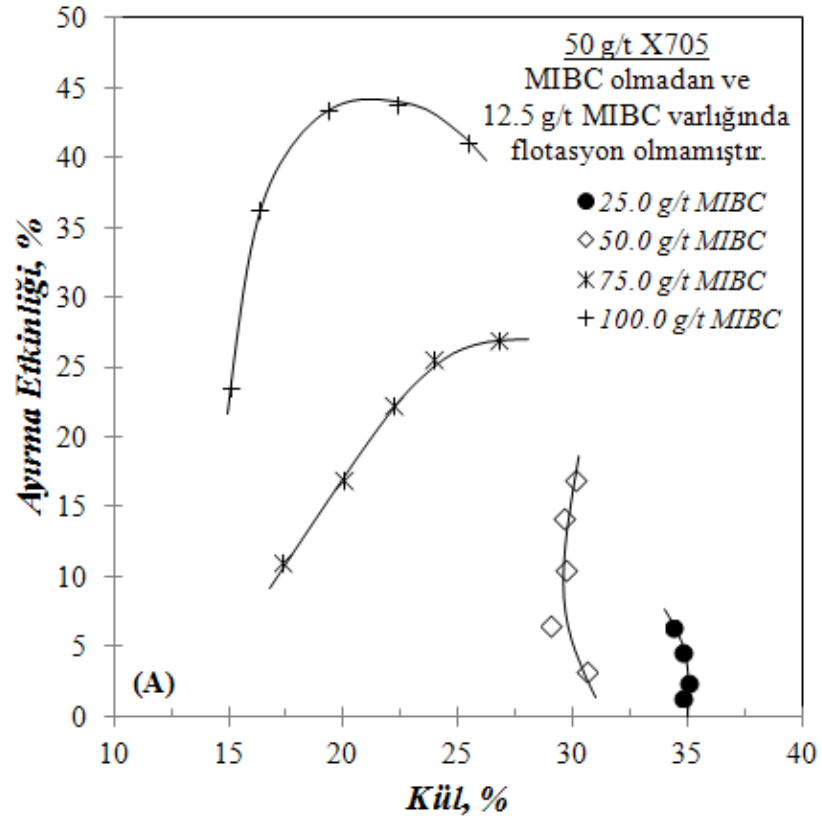


Şekil 3.14 : Triton X-165 kollektörü ile gerçekleştirilen flotasyon sonuçları a) ayırma etkinliği-kül ilişkisi b)yanabilir verim-kül ilişkisi

En yüksek HLB değerine sahip X-305 ve X-705 sürfaktanları birbirlerine yakın performans göstermişlerdir. 100 g/t MIBC ilavesiyle X-305 ile %18 küllü konsantre %45 ayırma etkinliği, %65 yanabilir verimle kazanılmıştır. X-705 ile %20 küllü konsantre %43 ayırma etkinliği ve %72 yanabilir verimle kazanılmıştır.

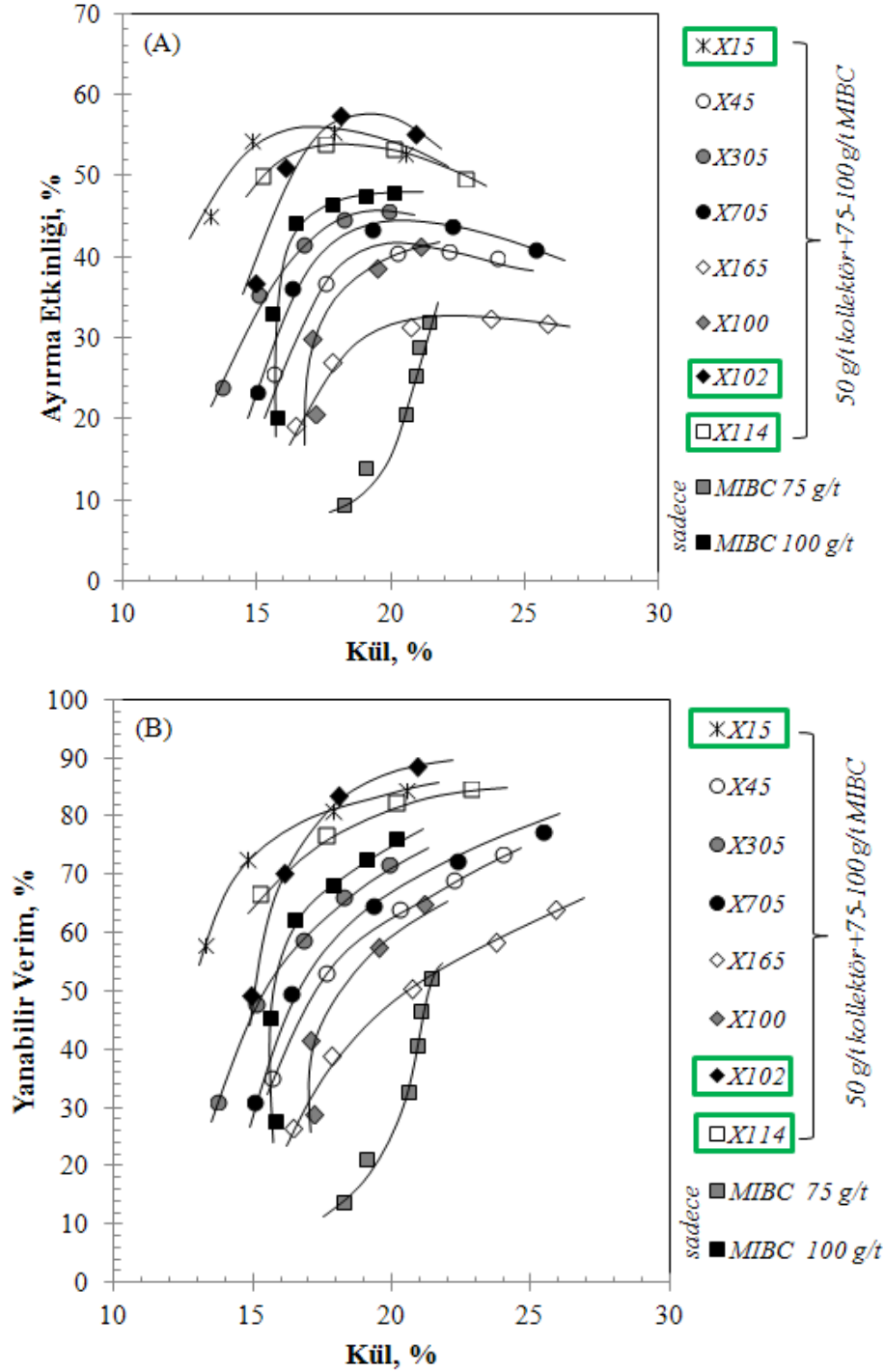


Şekil 3.15 : Triton X-305 kollektörü ile gerçekleştirilen flotasyon sonuçları a) ayırma etkinliği-kül ilişkisi b)yanabilir verim-kül ilişkisi



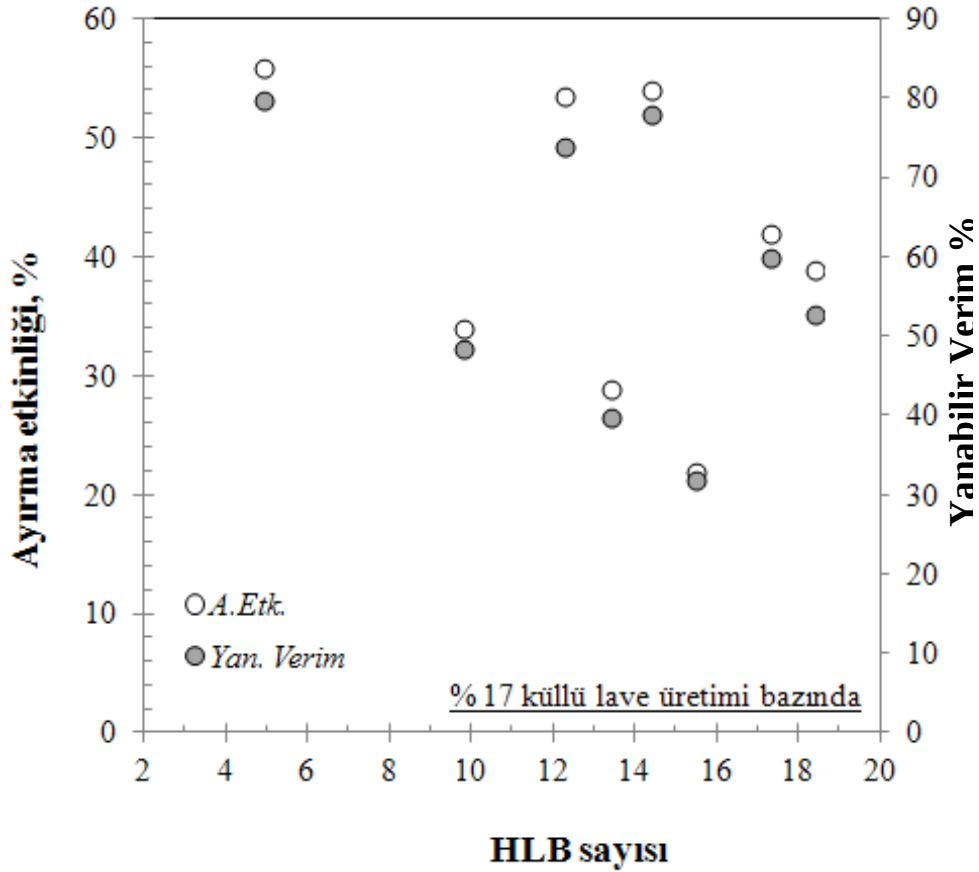
Şekil 3.16 : Triton X-705 kolektörü ile gerçekleştirilen flotasyon sonuçları a) ayırma etkinliği-kül ilişkisi b)yanabilir verim-kül ilişkisi

Yüksek HLB değerine sahip sürfaktanlar bitümlü kömürde daha yüksek miktarda bulunan karbonlu hidrofob yüzeylere hidrofob kuyruklarıyla hidrofobik bağlarla bağlanırlar. Düşük HLB değerli sürfaktanlara nazaran daha hidrofil olan baş kısımları açıkta kalarak yüzeyi daha hidrofil yaparak flotasyon performansını düşürmektedir. 50 g/t kollektör ve değişen köpürtücü miktarlarında gerçekleştirilen flotasyon deney sonuçları karşılaştırılması Şekil 3.17’de görülmektedir.



Şekil 3.17 : Kollektörlerin performansının karşılaştırılması

Sadece 75 ve 100 g/t köpürtücü kullanılarak yapılan flotasyon deneylerinin performansı da aynı şekilde izlenebilmektedir. Sadece MIBC uygulandığında 100 g/t köpürtücü miktarında %45 ayırma etkinliğine erişilmektedirken, çoğu sürfaktan bu performansı sağlayamamıştır. 100 g/t MIBC'dan daha iyi performans gösteren sürfaktanlar X-15, X-102 ve X-114 olmuştur. Diğer sürfaktanlara maksimum ayırma etkinliği için 100 g/t köpürtücüye ihtiyaç duyulurken, bu sürfaktanlar için 75 g/t köpürtücü yeterli olmuştur. Artan köpürtücü miktarı ayırma etkinliğini düşürmüştür. Şekil 3.18'de sürfaktanların artan HLB değerine göre flotasyon performansları incelenmektedir. HLB değerine bağlı bir değişim söz konusu olmamıştır.



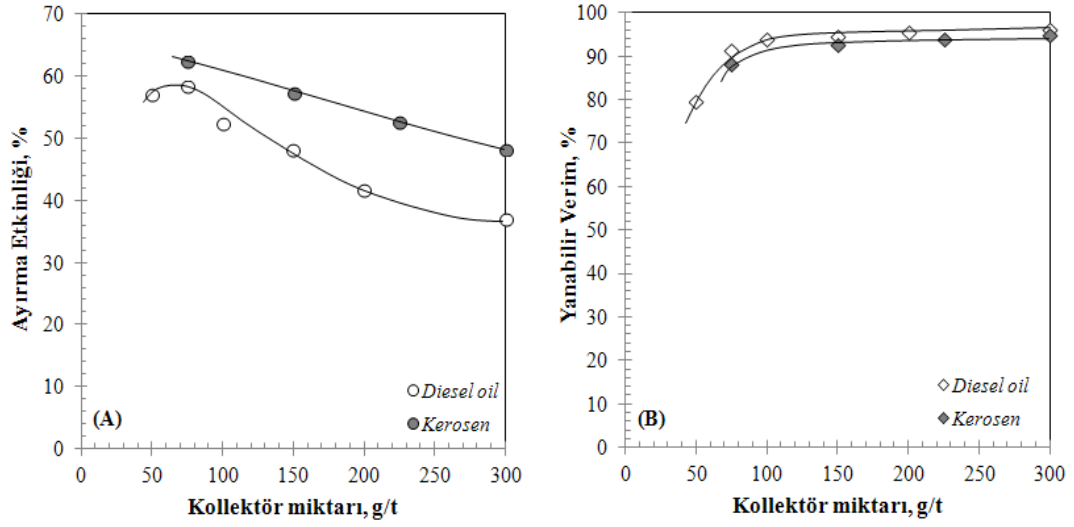
Şekil 3.18 : Optimum noniyonik sürfaktan ve köpürtücü miktarlarındaki flotasyon performanslarının HLB değişimine göre karşılaştırılması (değerlendirmeler % 17 küllü lave alımı üzerinden yapılmıştır)

Süpfaktanların flotasyon performansları kömür yüzeylerine adsorplanarak yüzeyi daha hidrofob yapabilme kapasiteleriyle ilgilidir. Bunun yanında süpfaktan ve köpürtücü miktarlarında oluşan farklı köpük stabilite ve boyutları da su kazanımını ve gang taşınmasını etkiler ve konsantre kül içeriği değişir.

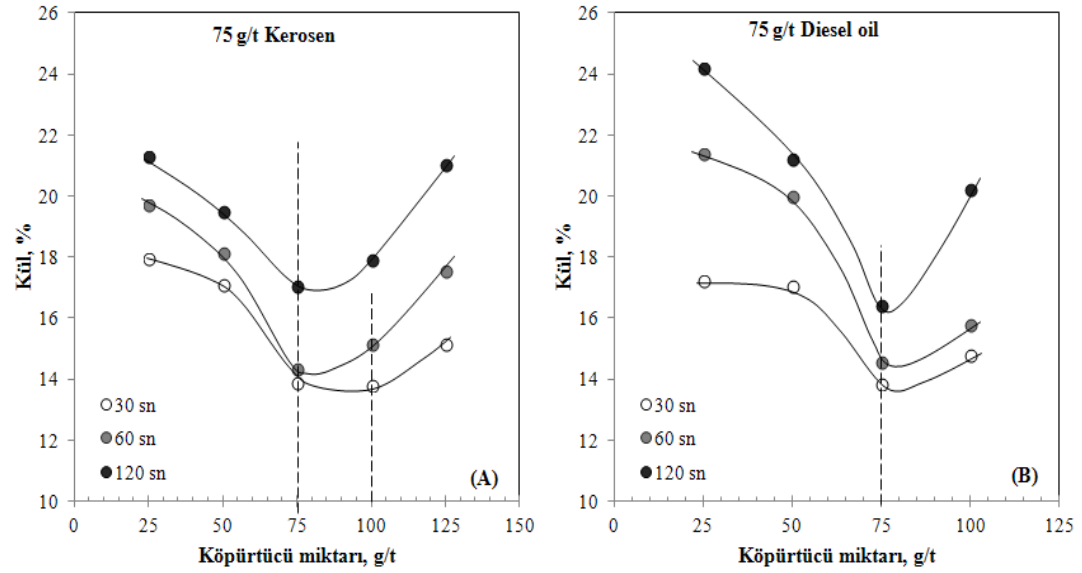
Non iyonik sürfaktanlar kömür yüzeyine hem baştan hem kuyruktan bağlanabilir. Hidrofob kuyrukla kömürün hidrofob kısmı arasında hidrofobik etkileşimler olur, oksijenli baş grupla kömür yüzeyindeki oksijenli kısımlar hidrojen bağları yapar. Bununla birlikte Triton-X tipi sürfaktanlarda bulunan fenol halkası bitümlü kömür yüzeyindeki aromatik bölgelerle π bağları yapar. Tüm reaktifler için bu bağların toplamı kömür yüzeyini yeterince hidrofob yapmışsa flotasyon performansını yüksek olacağı varsayılmıştır. Düşük HLB değerli sürfaktanlar hidrofob kuyrukları kömür yüzeyinde, hidrofil olan baş grupları suya dönük olarak yöneldiklerinde baş gruplarının polaritesi çok daha düşük olduğundan yüzey hidrofobluğunu yüksek HLB sürfaktanlar kadar bozmazlar.

3.2.3 Yağlı kollektörlerin (Motorin ve Kerosen) flotasyon performansı

Non-iyonik sürfaktanların flotasyon performanslarıyla karşılaştırılması amacıyla konvansiyonel kollektörler olan motorin ve kerosen kullanılarak flotasyon deneyleri gerçekleştirilmiş ve en uygun yağlı kollektör ile MIBC miktarının incelendiği flotasyon deney sonuçları Şekil 3.19 ve 3.20’de görülmektedir. Şekil 3.20’de motorin ve kerosen kollektörlerinin miktarına bağlı olarak ayırma etkinliğinin ve yanabilir verimin değişimi verilmiştir. Viskozitesi 2,64 cSt olan motorin yoğunluğu 0,84 g/cm³’tür. Kerosenin viskozitesi ise 1,50 cSt olup yoğunluğu 0,78 g/cm³’tür. Kerosenin çok az bir miktar daha başarılı olmasının sebebi yüzey kaplama hızının yüksek olması ve pülp içerisinde çok iyi dağılarak homojen bir emülsiyon oluşturmaya dayandırılabilir. Motorin kollektörü ile kerosen kollektörüne göre daha düşük verimlerin elde edilmesinin başlıca nedeni yoğunluğunun ve viskozitesinin diğerlerine göre daha yüksek olmasıdır. Bu durum Sönmez ve Cebeci’nin bulgularıyla paralellik göstermektedir (2006). 3 dakikalık kıvamlandırma süresi sonunda yüksek yoğunluğu ve viskozitesi nedeniyle pülp içerisine homojen dağılamayan motorin kömür yüzeyine yeterince adsorplanamamıştır. Bununla birlikte viskozitesi daha yüksek olan kollektörlerin kömür yüzeylerinde daha kalın bir film tabakası oluşturdıkları ve taneler arasında daha yüksek bir kapılar kuvvet oluşturdıkları düşünülürse, motorin kullanıldığında mekanik taşınma ve agregatlara hapsolme mekanizması ile köpüğe yapışan hidrofilik karakterdeki inorganik maddenin drenajı daha zor olacaktır. Dolayısıyla tanecik yüzeyinde daha ince bir film tabakası oluşturan kerosenin motorine göre daha iyi bir performans göstermesinin normal bir davranış olduğu anlaşılmıştır.

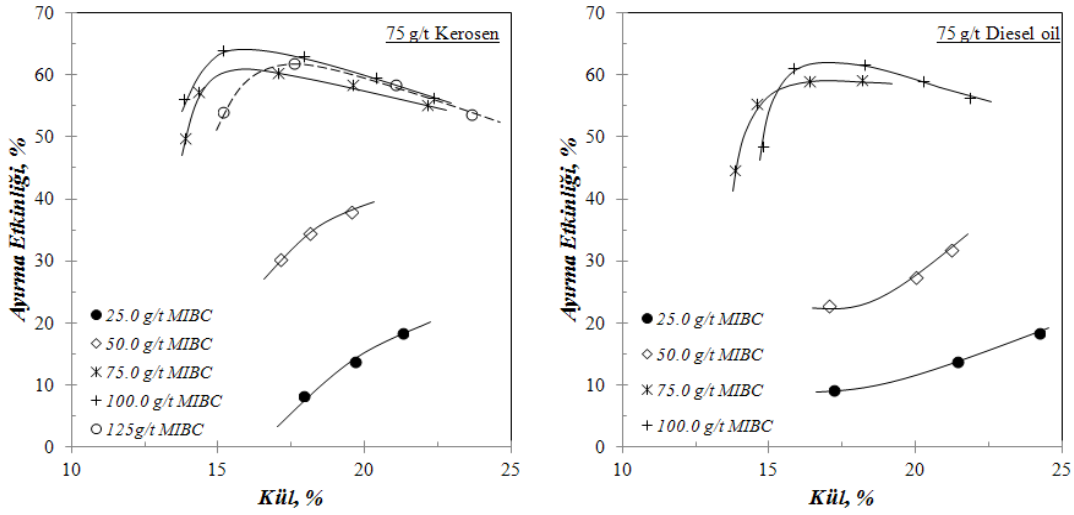


Şekil 3.19 : Optimum yağlı kollektör miktarının belirlenmesi



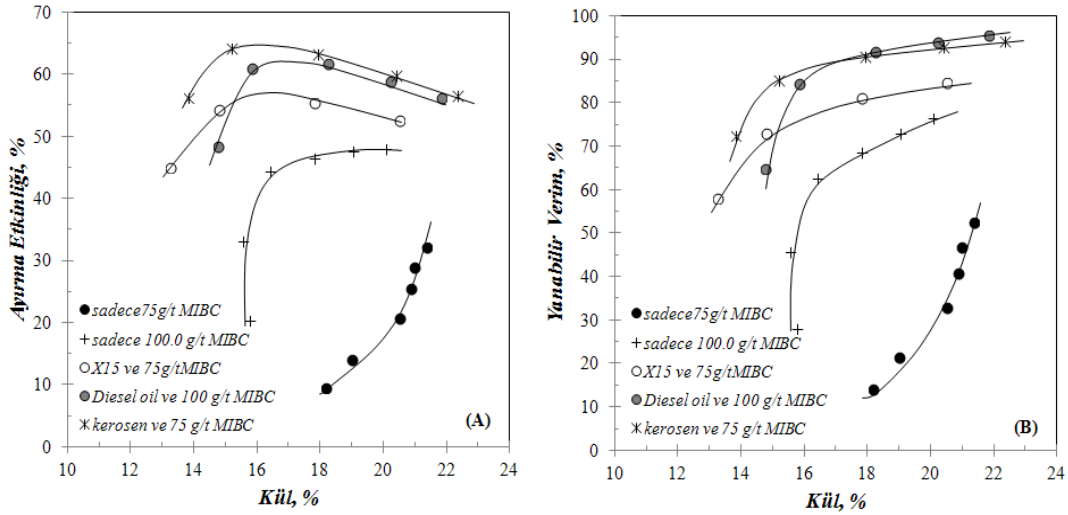
Şekil 3.20: Yağlı kollektörler varlığında optimum köpürtücü miktarının belirlenmesi

Şekil 3.19 ve 3.20'den izlenebileceği gibi en uygun yağlı kollektör miktarının 75 g/t olduğu ve en uygun köpürtücü miktarının ise motorin için 100 g/t, kerosen için 75 g/t olduğu tespit edilmiştir. En uygun yağlı kollektör ve köpürtücü miktarı saptandıktan sonra flotasyon süresinin incelendiği deney sonuçları Şekil 3.21'de verilmiştir.



Şekil 3.21 : Yağlı kollektörlerin flotasyon performanslarının belirlenmesi

Şekil 3.21’de görüldüğü üzere; yüksek kül içerikleri için benzer performans sergilemelerine rağmen düşük kül içerikli konsantrelerin üretiminde kerosenin daha etkin olduğu anlaşılmıştır. Sadece MIBC, en etkin non-iyonik sürfaktan olan X-15 ve yağlı kollektörlerin flotasyon performansının karşılaştırılması Şekil 3.22’de verilmiştir. En yüksek ayırma etkinliğine yağlı kollektörlerle ulaşıldığı ancak X-15 ile nispeten daha az küllü konsantreler elde edildiği görülmektedir.

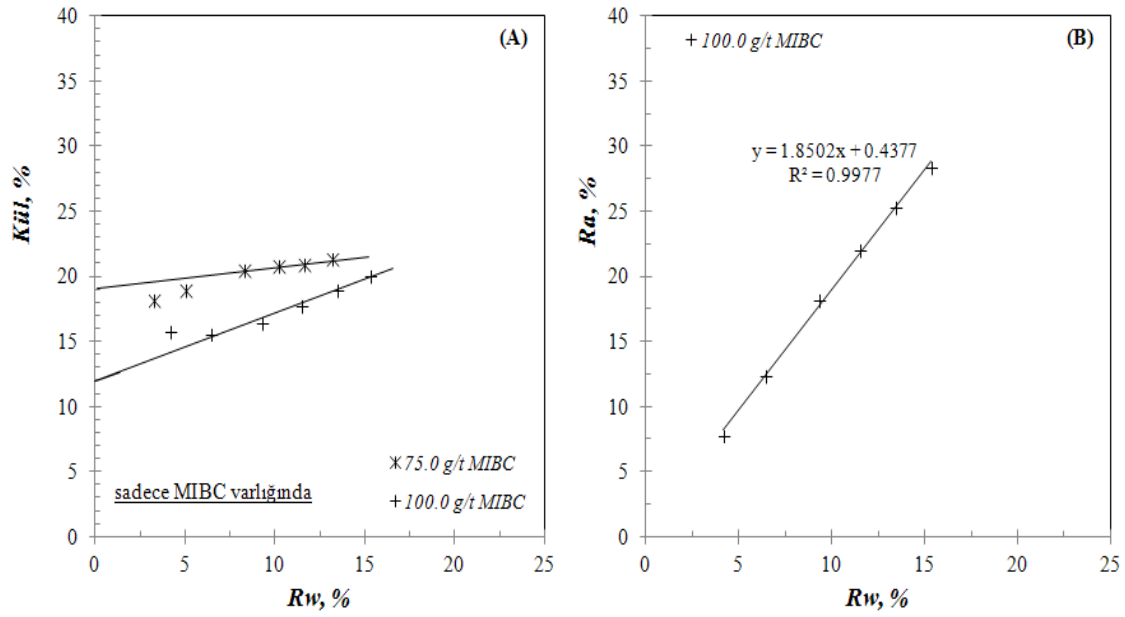


Şekil 3.22 : Optimum şartlarda gerçekleştirilen yağlı kollektör flotasyon performanslarıyla optimum sürfaktan cinsi ve miktarında gerçekleştirilen flotasyon performanslarının yalnızca köpürtücü varlığındaki performansla karşılaştırılması

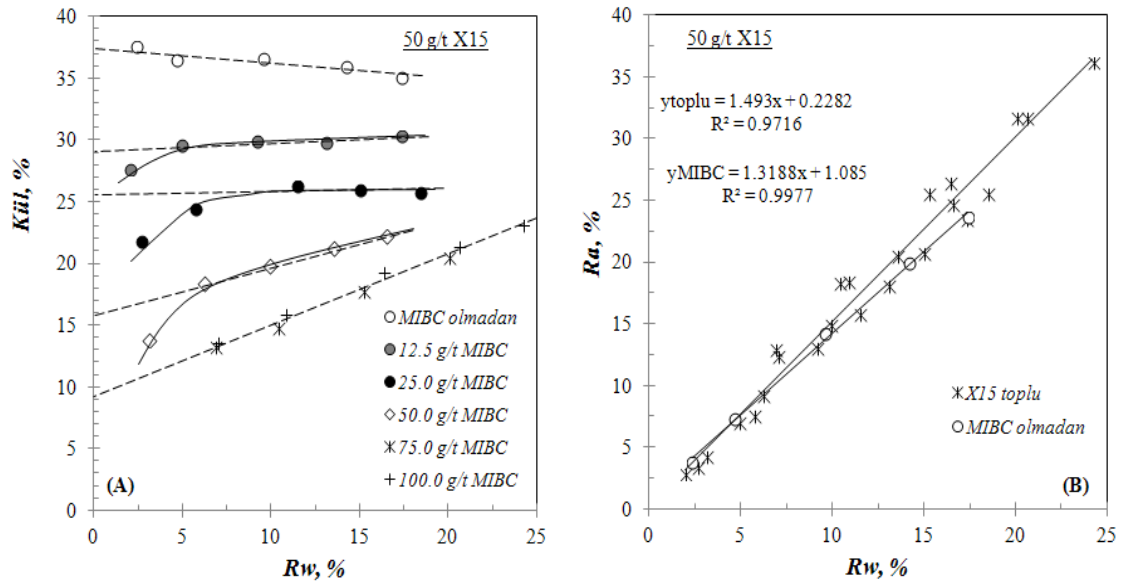
3.2.4 Non-iyonik sürfaktanların gang taşıma karakteristikleri

Mekanik taşınmanın flotasyon yöntemi ve cihazına ve bunun yanısıra kullanılan köpürtücü reaktifin tipi ve miktarına bağlı olarak değişim gösterdiği birçok araştırmacı tarafından ortaya konmuştur. Sadece köpürtücü miktarı açısından değerlendirildiğinde, köpürtücü miktarı artışına bağlı olarak köpük içerisindeki su kazanımının arttığı, artan su miktarına bağlı olarak da ince taneli hidrofilik gang minerallerinin köpüğe taşınma oranının arttığı bilinmektedir. Dolayısıyla deneysel çalışmaların bu kısmında, köpüğe su nakli ve köpükte kül kazanımı dengeleri ve grafikleri oluşturulmuş ve kullanılan kollektörlerin, köpükteki su ve kül kazanım karakteristikleri değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçları Şekil 3.23-3.25'te değerlendirilmiştir. %Kül-Rw grafiklerinden (%kül=konsantredeki kül içeriği%, R_w =su kazanımı) su kazanımının sıfır olduğu yani ince taneli hidrofilik inorganik maddenin köpüğe karışımının ihmal edildiği şartlarda, kullanılan kollektörlerle alınabilecek en düşük küllü konsantrelerin kül değeri elde edilmektedir. Bu değer bu çalışmada ENT_0 kül olarak ifade edilmiştir. Bu durumda sıfır su kazanımında konsantrede kazanılan kül yapıcı maddelerin daha çok *agregasyon yoluyla* karıştığı ya da *bünye küllü* olduğu düşünülerek karşılaştırmalar aynı zamanda agregasyon derecesi (ENT_0 kül) bazında da yapılmıştır. Ra-Rw grafikleri ise lineer bir ilişkiyi oluşturmakta ve doğruların eğimleri ise mekanik taşınma derecesini (ENT) vermektedir. Gang kazanımı (Ra) beslenendeki külün yüzde kaçının konsantreye geldiğinin ölçüsüdür.

Şekil 3.23-3.35'ten görüldüğü üzere, kullanılan tüm kollektörler ve kollektör olmadan kullanılan MIBC köpürtücüleri için, düşük köpürtücü konsantrasyonlarında uygun köpük oluşma şartlarının oluşmadığı ve köpükteki kül yapıcı maddelerin arttığı, köpürtücü miktarı arttıkça, mekanik taşınma ve agregatlara hapsolme mekanizmaları ile köpüğe karışan hidrofilik karakterdeki gang minerallerinin azaldığı gözlemlenmiştir.



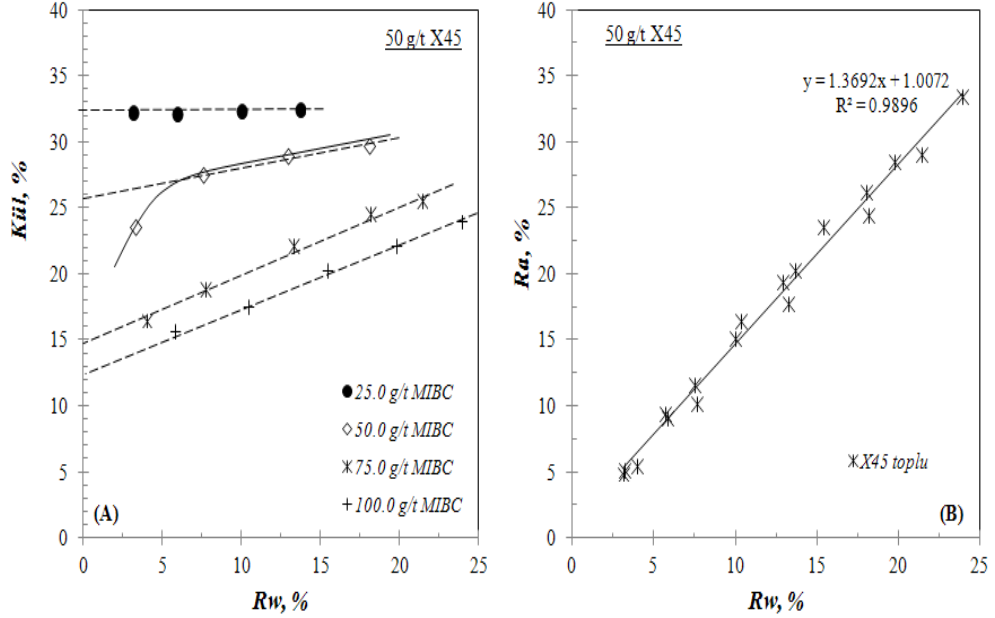
Şekil 3.23 : a) Sadece MIBC varlığında (75 ve 100 g/t) oluşan mekanik taşınma b) Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi (Rw: su kazanımı, Ra: kül kazanımı)



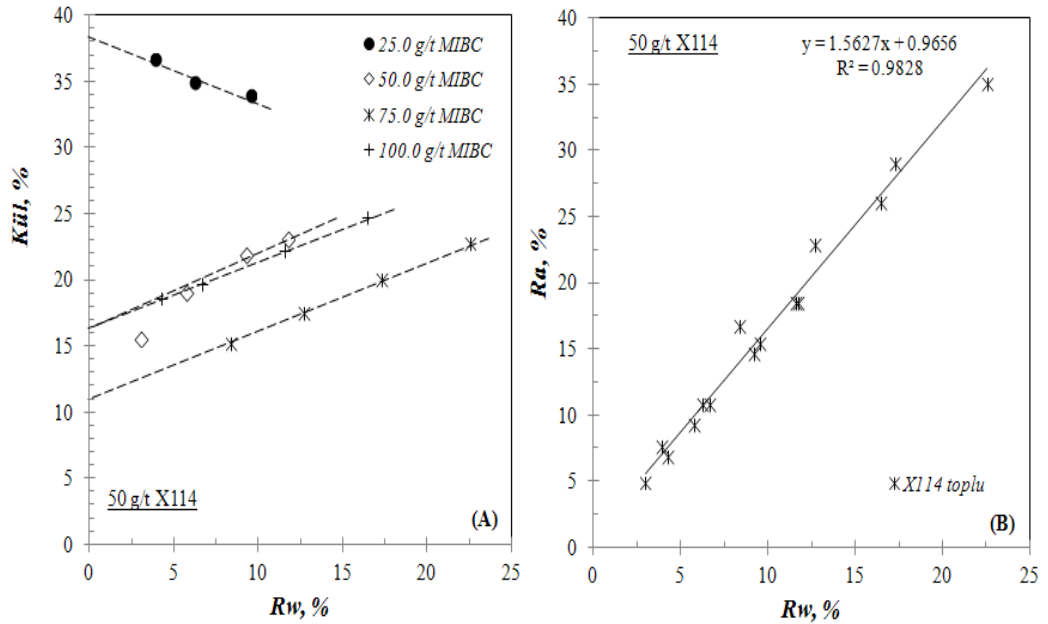
Şekil 3.24 : a)Optimum Triton X-15 ve değişen köpürtücü miktarlarında oluşan mekanik taşınma b)Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi)

Kullanılan tüm reaktiflerin agregatlara hapsolme ve mekanik taşınma dereceleri Çizelge 3.3'te verilmektedir. Çizelge 3.3'de görüldüğü üzere; yağlı kollektörlerle yapılan flotasyon sonucu elde edilen köpükteki su kazanımının sıfır olduğu durumlarda %9 kül içerikli konsantreler elde edildiği, orta HLB derecelerine sahip kollektörlerle ve uygun miktardaki MIBC (100 g/t) varlığında gerçekleştirilen flotasyon sonucu birbirine yakın kül içerikli (%11-14) konsantreler üretilebildiği,

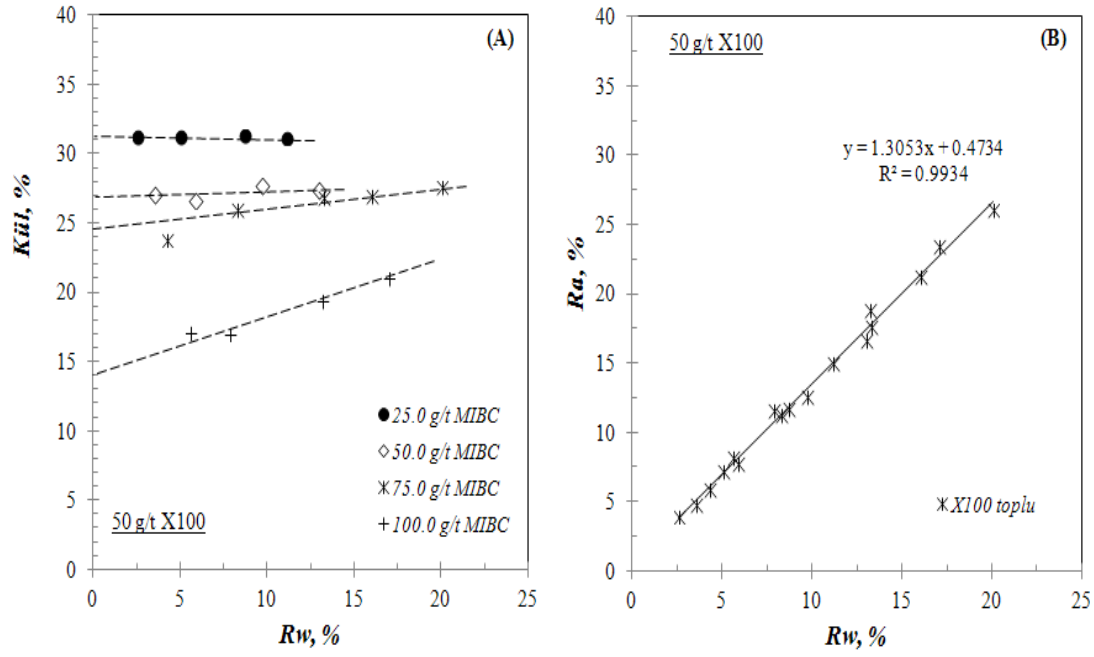
kollektör olmadan sadece 75 g/t MIBC varlığında ise köpükteki kül içeriğinin %19 seviyelerine ulaştığı saptanmıştır. Dolayısıyla daha düşük HLB derecesine sahip noniyonik ve yağlı kollektörlerle daha düşük kömür konsantrasyonlarının üretildiği ve oluşan agregatlar içine karışan iri boyutlu hidrofilik gangin daha da azaldığı saptanmıştır.



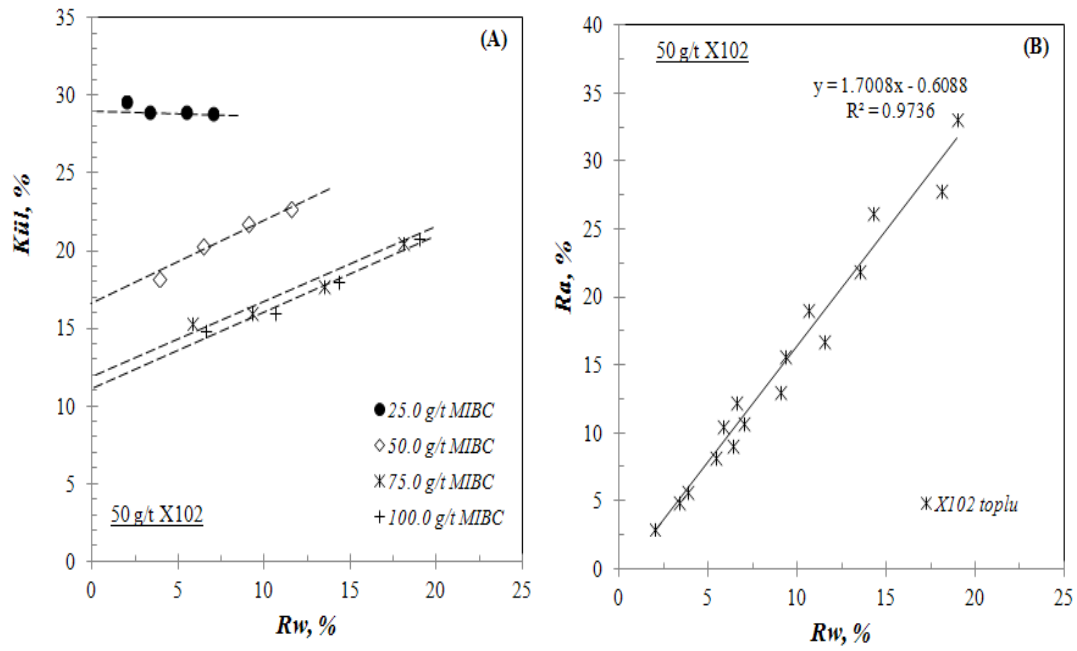
Şekil 3.25 : a)Optimum Triton X-45 ve değişen köpürtücü miktarlarında oluşan mekanik taşınma b)Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi)



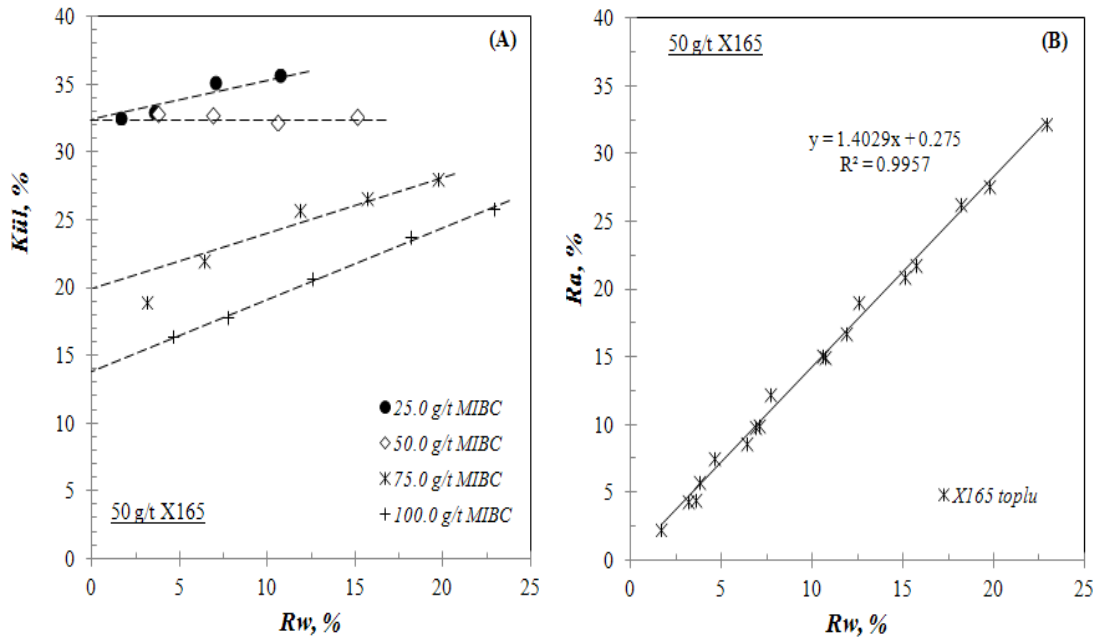
Şekil 3.26 : a)Optimum Triton X-114 ve değişen köpürtücü miktarlarında oluşan mekanik taşınma b)Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi)



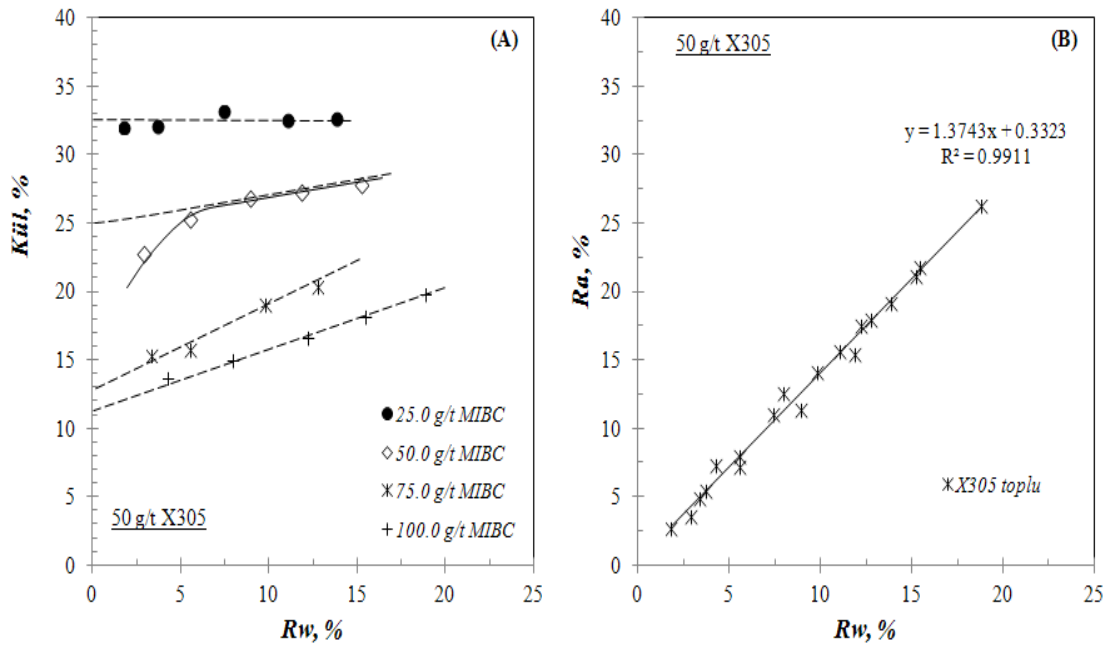
Şekil 3.27 : a)Optimum Triton X-100 ve değişen köpürtücü miktarlarında oluşan mekanik taşınma b)Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi)



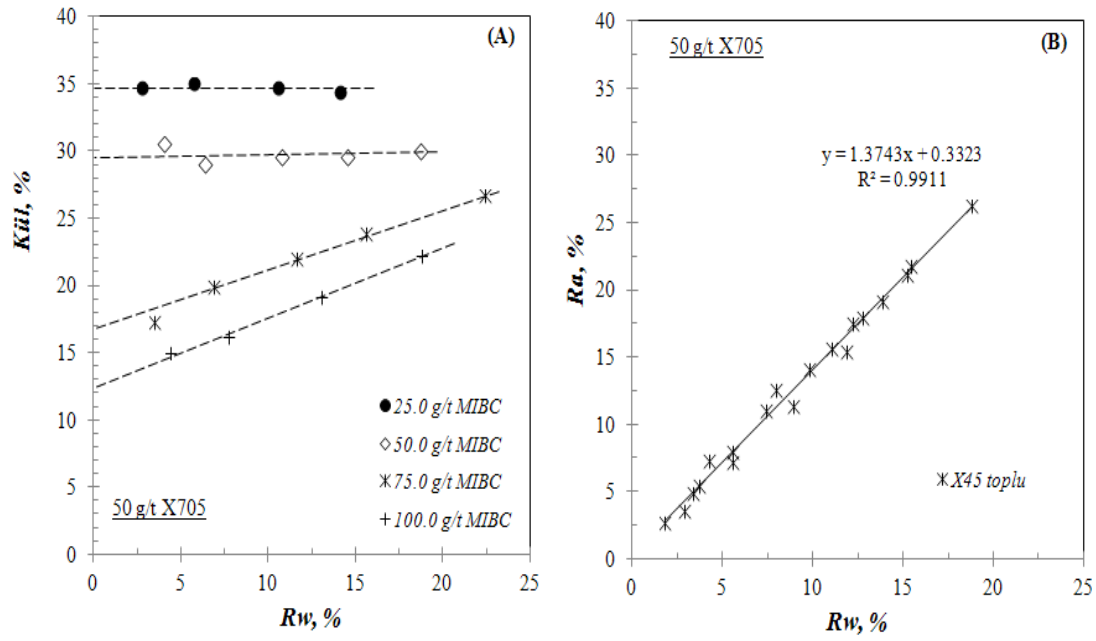
Şekil 3.28 : a)Optimum Triton X-102 ve değişen köpürtücü miktarlarında oluşan mekanik taşınma b)Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi)



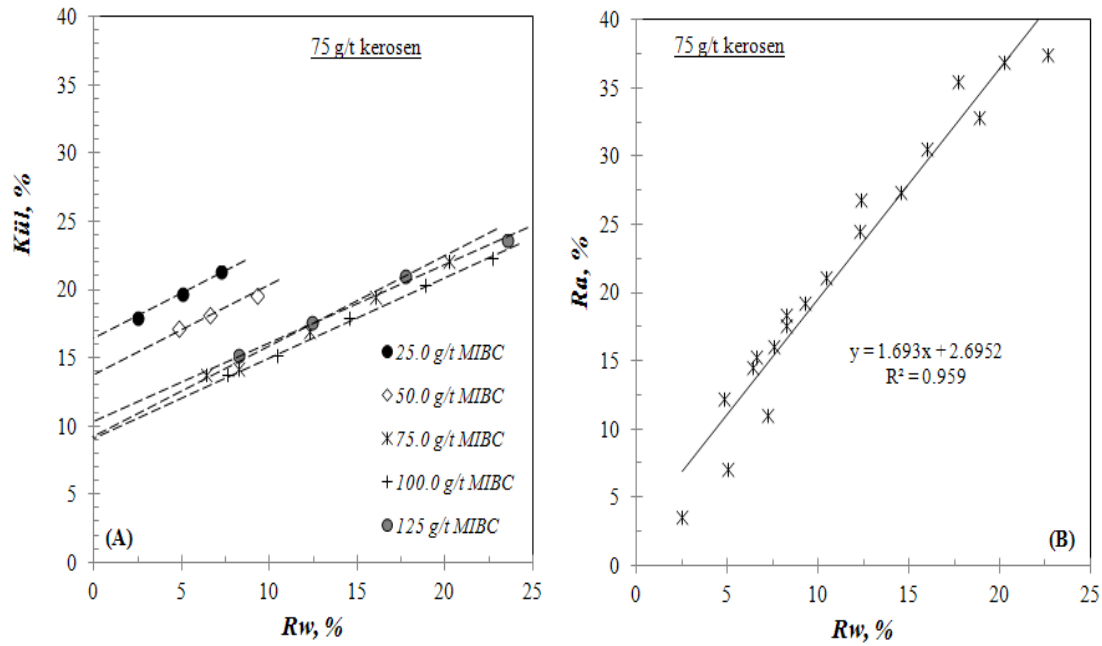
Şekil 3.29 : a)Optimum Triton X-165 ve değişen köpürtücü miktarlarında oluşan mekanik taşınma b)Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi)



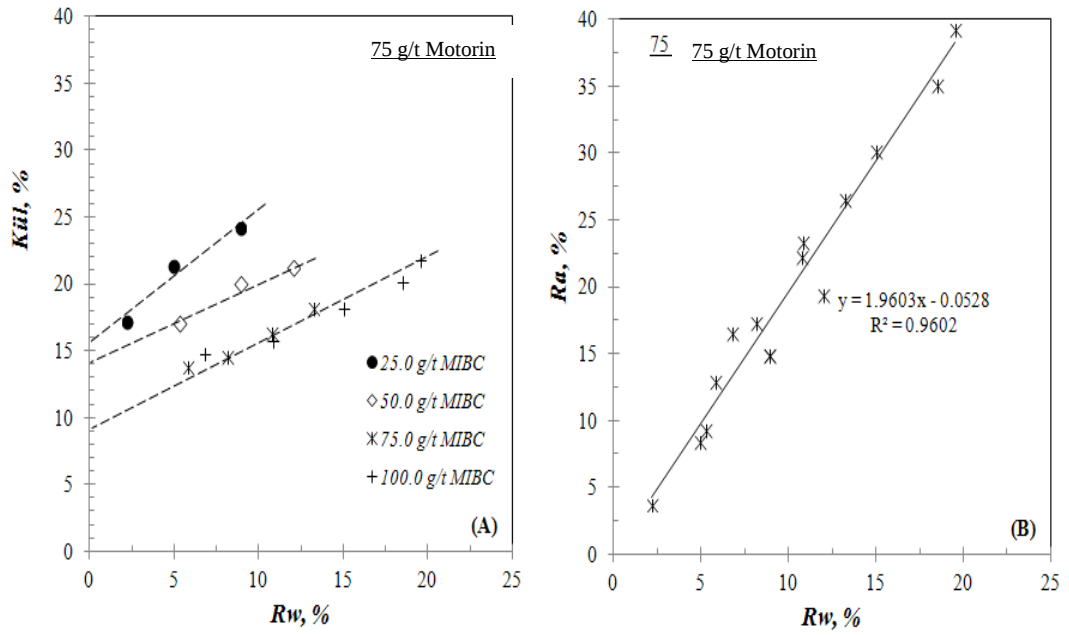
Şeki 3.30 : a)Optimum Triton X-305 ve değişen köpürtücü miktarlarında oluşan mekanik taşınma b)Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi)



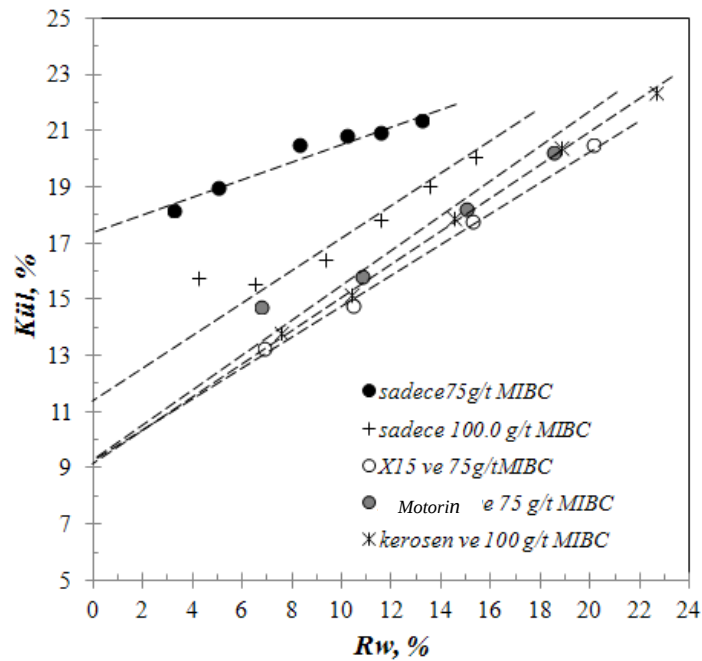
Şekil 3.31: a)Optimum Triton X-705 ve değişen köpürtücü miktarlarında oluşan mekanik taşınma b)Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi



Şekil 3.32 : a)Optimum Kerosen ve değişen köpürtücü miktarlarında oluşan mekanik taşınma b)Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi



Şekil 3.33 : a)Optimum Motorin ve değişen köpürtücü miktarlarında oluşan mekanik taşınma b)Flotasyon köpüğündeki su kazanımı-kül kazanımı ilişkisi



Şekil 3.34 : En uygun kollektör ve köpürtücü konsantrasyonları varlığında oluşan mekanik taşınma dereceleri

Tüm noniyonik ve yağlı kollektörlerin $ENT_{0k\ddot{u}l}$ ve ENT değerleri Çizelge 3.4'te gösterilmiştir. Flotasyon performansı en uygun non iyonik kollektör olan X-15 ve yağlı kollektörlerin su kazanımı (R_w) – Kül içerikleri Şekil 3.34'te verilmektedir. Şekil 3.34'e göre sadece 75 g/t MIBC varlığında su kazanımının sıfır olduğu köpüklerde elde edilen kömür konsantresinin kül içeriği %17,5 iken, MIBC

miktarının 100 g/t'a çıkarılmasıyla bu değer %11,5 seviyesine inmiştir. X-15, motorin ve kerosen için ise bu değer %9 olarak saptanmıştır. X-15 ve yağlı kollektörler için bu değerlerin benzer olması %9'un bünye külü olduğuna işaret etmektedir.

Çizelge 3.3 : Reaktif cinsine göre değişen agregatlara hapsolma yüzdesi ve mekanik taşınma derecesi

Reaktif	HLB	Agregatlara Hapsolma ENT₀kül*	Mekanik Taşınma
Motorin	-	9.0	1.96
Kerosen	-	9.0	1.69
x15	4.9	9.0	1.49
x45	9.8	12.5	1.37
X114	12.3	11.0	1.56
X100	13.4	14.0	1.31
X102	14.4	11.0	1.70
X165	15.5	14.0	1.40
x305	17.3	11.5	1.37
x705	18.4	12.5	1.37
MIBC-75 g/t	-	19.0	yapılmadı
MIBC-100 g/t	-	12.0	1.85

* mekanik taşınma olmadığı durumlarda yani köpükte suyun kazanılmadığı durumlardaki konsantre ürünün kül içeriği, %

Çizelge 3.3'te görüldüğü üzere motorin, kerosen ve X-15 için ENT₀kül değerleri %9 iken diğer non-iyonik sürfaktanlar için bu değer %11-14 arasında değişmektedir.

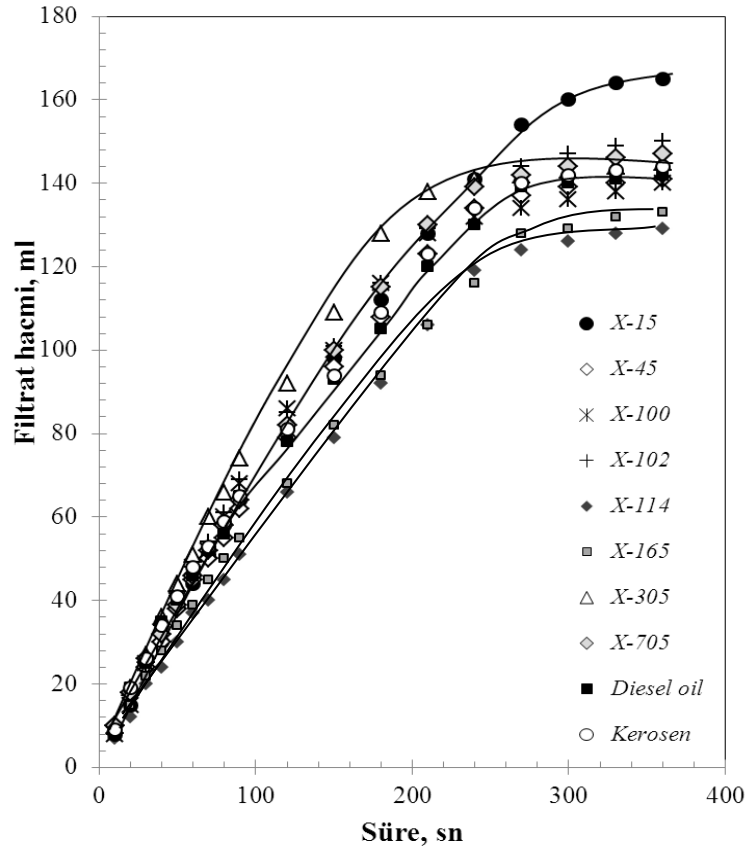
3.2.5 Farklı yapıdaki non-iyonik sürfaktanların filtrasyon karakteristikleri

Flotasyon ile zenginleştirme çalışmalarında kullanılan kollektörlerin susuzlandırma performansına etkilerinin incelendiği deneylerde, her bir kollektör için %17 küllü bir lave elde edilmesi için gerekli olan şartlarda yapılan flotasyon işlemi sonucunda elde edilen flotasyon köpükleri kullanılmıştır. %17 küllü bir flotasyon konsantresi için gerekli olan şartlar ve elde edilen köpüklerdeki PKO'lar Çizelge 3.4'te verilmektedir. Çizelge 3.4'te verilen şartlarda ve üretilen özelliklerde verilen flotasyon köpüklerinin susuzlandırma özellikleri Şekil 3.35 ve 3.36'da verilmektedir. Şekil 3.35'te farklı reaktif çeşitleri için filtrat hacminin (V) filtrasyon süresine (t) bağlı değişimi gösterilmiştir. Kek formasyon süresinin en iyi sonucu veren X-15 sürfaktarıyla 30

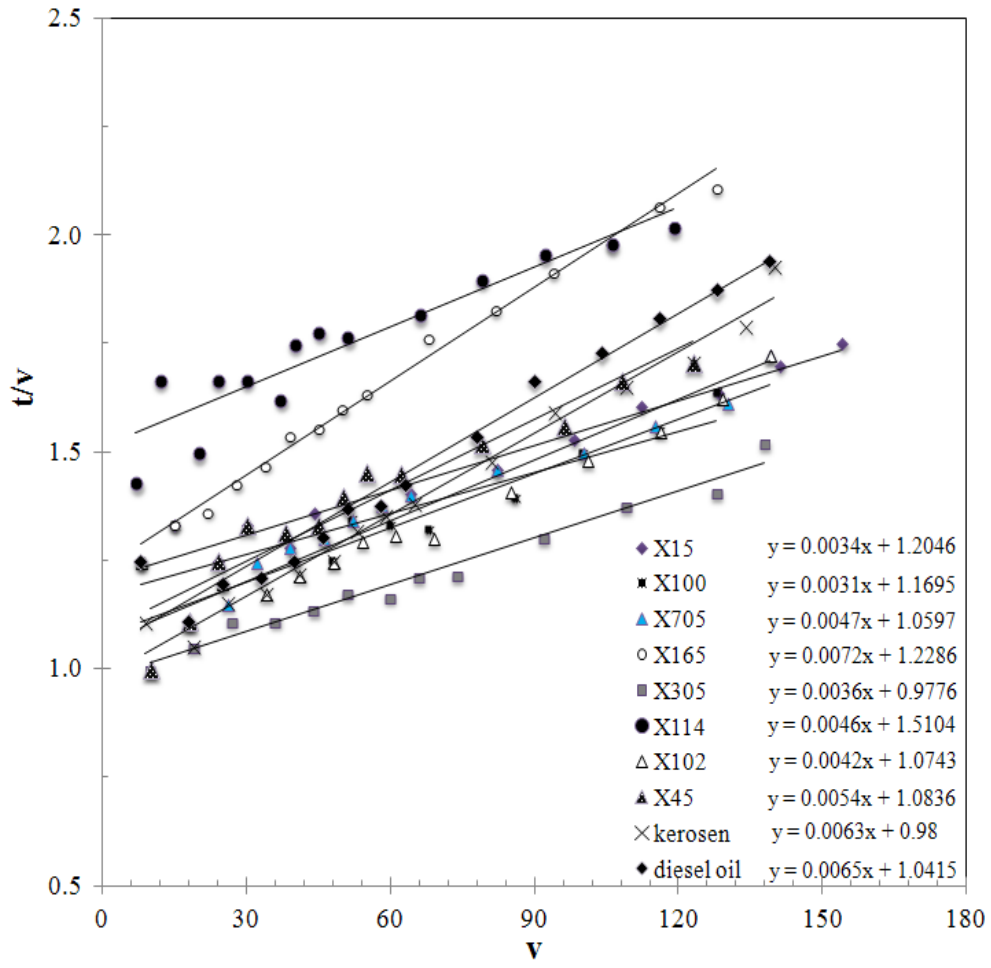
sn'ye çıktığı görülmektedir. Eğrilerin eğimi filtrasyon hızını verir. Daha büyük eğim daha hızlı filtrasyona işaret etmektedir.

Çizelge 3.4 : %17 küllü lave kazanımı için filtrasyon işlemi öncesi uygulanması gereken flotasyon deney şartları ve elde edilen PKO ve kül içeriği

Kollektör türü	Kollektör miktarı g/t	MIBC miktarı g/t	Köpük alma süresi (sn)	Pülpte katı oranı %	Kül %
X15	50	75	120	23,5	17,80
X45	50	100	60	25,3	17,54
X114	50	75	60	25,8	17,59
X100	50	100	60	28,5	17,02
X102	50	100	90	22,1	17,05
X165	50	100	60	25,4	17,80
X305	50	100	150	23,1	17,50
X705	50	100	90	25,9	17,50
Motorin	75	100	90	20,7	17,10
Kerosen	75	100	90	21,2	17,03



Şekil 3.35 : Filtrasyonda süreye bağlı olarak ölçülen filtrat hacmi



Şekil 3.36 : V'ye karşı t/V grafiği ve regresyon denklemleri

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Zonguldak Bölgesi, Deka Firmasına ait bitümlü kömür şlamı ($-200\ \mu\text{m}$ üzerinde, farklı non-iyonik sürfaktanlar ve karşılaştırma amaçlı motorin ve kerosen gibi nötr hidrakerbonlar (yağlı kollektörler) kullanılarak flotasyon ve susuzlandırma çalışmaları gerçekleştirilmiş olup sonuçlar aşağıda özet halinde verilmiştir. Bilindiği üzere, flotasyonda kollektör olarak kullanılan kimyasallar kömür yüzeylerinin hidrofobluğunu arttırmakta ve yüzebilmesini sağlamaktadır. Buna ilave olarak benzer kimyasallar aynı zamanda susuzlandırma ajanı olarak da kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalarda kullanılan noniyonik karakterdeki kollektörler yapıları gereği, köpüğe su transferini etkilemekte ve bu da su ile birlikte gelen ince taneli hidrofilik maddelerin miktarını önemli ölçüde etkilemektedir. Köpükteki su kazanımı ayrıca flotasyon köpüğünün katı içeriğini değiştirmekte ve bu da kömür konsantresinin bir sonraki susuzlandırma prosesindeki davranışını etkilemektedir. Dolayısıyla farklı kimyasalların flotasyon performansına etkisi (ayırma etkinliği ve mekanik taşınma) ve sonraki susuzlandırma prosesindeki ortak etkilerinin birlikte değerlendirilmesi ve en uygun kollektör seçiminin bu iki kritere göre yapılması daha doğru bir yol olacaktır. Bu tez çalışmasında, farklı non-iyonik sürfaktanlar ve karşılaştırma amaçlı motorin ve kerosen gibi nötr hidrakerbonlar (yağlı kollektörler) kullanılarak, bu kimyasalların flotasyon performansı, gang taşıma özellikleri (mekanik taşınma) ve susuzlandırma performansları değerlendirilmiştir.

Boyuta göre ayırma deneyleri sonucunda; flotasyon çalışmaları öncesinde bitümlü kömür şlamının boyut dağılımı tespit edilmiş ve bitümlü kömür şlamı d_{80} boyutunun $120\ \mu\text{m}$, d_{50} boyutunun $38\ \mu\text{m}$ olduğu tespit edilmiştir.

Boyuta göre bir ayırma yapıldığında nasıl bir zenginleştirme sağlanacağını tespiti amacıyla ise, farklı boyutlardan eleme usulu ile elek altı ve üstü numuneler alınarak boyuta göre sınıflandırma şartları ve ayırma performansı değerlendirilmiştir. $100\ \mu\text{m}$ kesme boyutu ile boyuta göre sınıflandırmada %10.12 küllü bir lave %42.2 yanabilir verim ve %35.8 ayırma verimi ile elde edilirken, $53\ \mu\text{m}$ kesme boyutu uygulaması

ile %16.26 küllü bir lavenin %63.5 yanabilir verim ve %46.0 ayırma etkinliği ile elde edilebileceği tespit edilmiştir. Buradan zenginleştirme yapılmadan yalnızca boyuta göre ayırım tercih edildiğinde yüksek ayırma etkinliklerine ulaşamayacağı anlaşılmaktadır.

Flotasyon deneyleri sonucunda; farklı non iyonik karakterde kollektörler kullanılarak, optimum kollektör miktarının incelendiği deneysel çalışmalarda; en uygun miktarın bütün non-iyonik sürfaktanlar için 50 g/t olduğu tespit edilmiştir.

50 g/t optimum kolektör miktarı ile yapılan ve köpürtücü konsantrasyonunun incelendiği deneyler sonucunda sadece 75 g/t MIBC (10.71 ppm) varlığında elde edilen %35 seviyelerindeki ayırma etkinliğinin köpürtücü miktarını 100 g/t (14.28 ppm) seviyelerine çıkartıldığında %47'lere ulaştığı tespit edilmiştir. MIBC için kritik birleşme konsantrasyonu 11.2 ppm'dir. Dolayısıyla bu eşik değerinin altında kısmen de olsa birleşme gözlemlendiğinden ayırma etkinliği düşük seviyelerde çıkmıştır.

X-15 ve X-114 kollektörleri için en uygun köpürtücü miktarı 75 g/t olarak saptanırken diğer X serisi noniyonik kollektörler için en uygun köpürtücü miktarı 100 g/t olarak tespit edilmiştir.

Sadece 100 g/t MIBC kullanılarak gerçekleştirilen flotasyon sonucunda ulaşılan %47 seviyelerindeki ayırma etkinliği eşik değer olarak alınırsa bu değer üzerinde ayırma etkinliğine sadece X-15, X-102 ve X-114 kollektörleriyle ulaşıldığı tespit edilmiştir. %17 küllü bir lave üretimi baz alındığında (Şekil 3.17), Sadece 100 g/t MIBC ile ulaşılan %47 seviyelerindeki ayırma etkinliği , 50 g/t X-102 ya da X-114 ve 100 g/t MIBC kullanılarak %54 seviyelerine, 50 g/t X-15 ve 75 g/t MIBC kullanılarak %57 seviyelerine arttırılmıştır.

Karşılaştırma amaçlı kollektör olarak motorin ve kerosen gibi nötr hidrokarbonların kullanıldığı flotasyon deneyleri sonucunda ise 75 g/t kollektör miktarının en uygun olduğu, ve köpürtücü konsantrasyonu olarak 75-100 g/t'un uygun olduğu tespit edilmiştir. Motorin ve kerosen ile yapılan flotasyon işlemi sonucunda, yine %17 küllü bir lave üretimi için elde edilen ayırma etkinliklerinin sırasıyla %62 ve %64 olduğu tespit edilmiştir. Kerosen ve motorinin daha temiz küllü bir lave üretimi için performansları karşılaştırıldığında ise yine kerosenin daha etkin olduğu saptanmıştır.

Mekanik taşınma karakteristiğinin incelendiği çalışmalar sonucunda; ENT₀kül olarak ifade edilen ve su kazanımının sıfır olduğu ve mekanik taşınmanın ihmal edildiği durumlarda en düşük küllü kömür konsantrasyonlarının yine optimum köpürtücü konsantrasyonlarında elde edildiği saptanmıştır. ENT₀kül değerleri nötr hidrakerbonlar ve X-15 için %9 seviyelerinde tespit edilirken, daha yüksek HLB değerlerindeki noniyonik kollektörlerle ve sadece 100 g/t MIBC varlığında gerçekleşen flotasyonda elde edilen köpükler için bu değerlerin %11-14.5 arasında olduğu belirlenmiştir. Sadece 75 g/t MIBC kullanıldığında ise bu değer %19 seviyelerine ulaştırmıştır ki, bu da uygun flotasyon şartlarının sağlanmadığı, düzgün köpük oluşmadığını belirtmektedir.

Mekanik taşınma karakteristikleri incelendiğinde ise; çok yüksek HLB değerlerine sahip non-iyonik sürfaktanlarla mekanik taşınmanın oldukça düşük seviyelerde olduğu tespit edilmiştir (X-165, X-305 ve X-705 için mekanik taşınma derecesi 1,4'tür). Sadece 100 g/t MIBC varlığında yapılan flotasyon işleminde ise mekanik taşınma derecesinin (ENT) 1,85 olduğu tespit edilmiştir. Yağlı kollektörler ve düşük HLB derecesine sahip sürfaktanlar daha ince, sıkı ve akışkan köpük yapısı oluşturmaları nedeniyle nispeten daha yüksek taşınma derecelerine sahiptir.

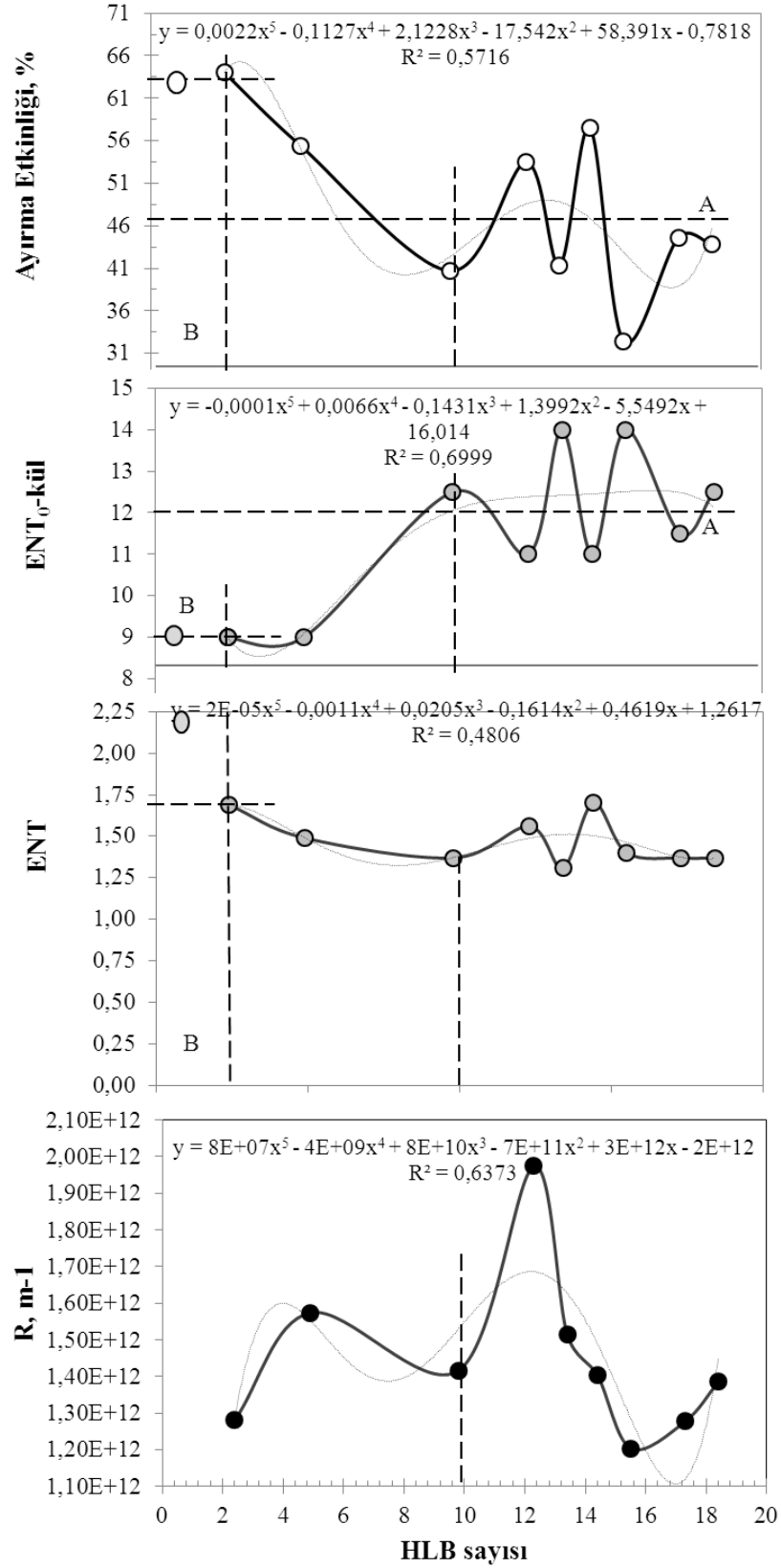
Susuzlandırma performansının filtrasyon deneyleriyle incelendiği çalışmalarda; Kül yapıcı madde tipi ve içeriğinin susuzlandırmada önemli bir parametre olduğu bilindiğinden, her bir kollektör için %17 küllü bir lave üretimi için gerekli olan şartlarda flotasyon deneyleri yapılmış ve üretilen köpükler doğrudan susuzlandırma işlemine tabii tutulmuştur. Böylelikle kollektör tipi dışında kalan etkenler elimine edilmiştir. Yapılan susuzlandırma işlemi sonucunda, HLB değeri-susuzlandırma karakteristiği ilişkisi açısından spesifik kek direnci (α) ve ortam direnci (R) parametreleri baz alınmıştır. Bu parametrelerden ortam direncinin daha düzgün bir korelasyon verdiği saptanmıştır. Ortam dirençleri karşılaştırıldığında çok düşük ve çok yüksek HLB değerlerine sahip noniyonik kollektörlerle yapılan susuzlandırma işlemlerinde ortam direncinin daha düşük olduğu, yani susuzlandırmanın daha kolay gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Tüm kollektörlerin flotasyon performansı, mekanik taşınma karakteristiği ve filtrasyon performansının Çizelge 4.1'de toplu gösterilmiştir. HLB sayısına göre

flotasyon performansının, mekanik taşınma derecesinin ve filtrasyon performanslarının değerlendirildiği eğriler ise Şekil 4.1’de sunulmuştur.

Sonuç olarak; deneysel çalışmalarda kullanılan farklı noniyonik karakterli sürfaktanların bitümlü kömür şlamı flotasyonu ayırma performansı, mekanik taşınma karakteristikleri ve susuzlandırma performansları birlikte değerlendirildiğinde; Triton X-15’in diğerlerine oranla daha üstün bir kolektör olduğu tespit edilmiştir. Ancak yine de bu kolektörün performansı kömür flotasyonunda klasik kolektörlerden olan kerosen ve motorinin altında kalmıştır. Ayrıca, flotasyon performansı-mekanik taşınma ve susuzlandırma performansı bazında belirgin bir uyum gözlenirken, HLB değeri ve ayırma performansı, mekanik taşınma karakteristikleri ve susuzlandırma performansları arasında net bir ilişki kurulamamıştır.

Gelecek çalışmalar mekanik hücrelerdeki bazı olumsuz koşullar (yoğun türbülans, yıkama suyunun olmayışı, derin olmayan köpük zonu) özellikle çok ince boyutlu kömür tanelerinin flotasyonunda yeterli verim ve yüksek kül giderme oranlarını sağlayamaması nedeniyle yeni teknoloji flotasyon hücrelerinde de denenebilir. Çalışmanın devamında non-iyonik sürfaktanların flotasyon performansının daha iyi anlaşılabilmesi için düşük kömürleşme derecesine sahip, zor yüzen linyitler ve okside olmuş kömürler üzerinde de flotasyon deneyleri uygulanabilir. Türkiye linyitlerinin sürfaktanla yüzebilirliğini araştıran çalışma sayısı azdır (Cebeci, 2002). Türkiye linyitleri üzerinde paralel bir çalışma yapılabilir. Sürfaktanların yağlı kolektörlerle birlikte kullanımı da yüzeye etki mekanizmasını anlaşılması açısından önemlidir. Sürfaktanlar yağlı kolektörlerle emülsifiye edilerek kullanılabilir.



Şekil 4.1 : HLB sayısına göre flotasyon performansının, mekanik taşınma derecesinin ve filtrasyon performanslarının değerlendirilmesi

Çizelge 4.1 : Tüm kollektörlerin flotasyon performansı, mekanik taşınma karakteristiği ve filtrasyon performansının toplu gösterimi

Kollektör/ Köpürtücü	HLB	FLOTASYON PERFORMANSI				MEKANİK TAŞINMA KARAKTERİSTİĞİ			SUSUZLANDIRMA KARAKTERİSTİĞİ	
		OKOLM g/t*	OKÖPM g/t*	Y.V*	A.E*	PKO %	ENT0kül %	Mekanik Taşınma derecesi ENT	α (m/kg)	R (m ⁻¹)
Motorin	-	75	100	91,9	62.00	20,7	9.0	1.96	1.16456E+17	1.30E+12
Kerosen	-	75	100	85,2	64.00	21,2	9.0	1.69	1.14193E+17	1.28E+12
x15	4.9	50	75	81	55.41	23,5	9.0	1.49	6.82176E+16	1.57E+12
x45	9.8	50	100	69,3	40.70	25,3	12.5	1.37	1.16829E+17	1.42E+12
X114	12.3	50	75	82,5	53.45	25,8	11.0	1.56	1.01288E+17	1.97E+12
X100	13.4	50	100	64	41.36	28,5	14.0	1.31	7.54322E+16	1.52E+12
X102	14.4	50	100	83,6	57.51	22,1	11.0	1.70	7.91769E+16	1.40E+12
X165	15.5	50	100	58,7	32.40	25,4	14.0	1.40	1.17106E+17	1.20E+12
x305	17.3	50	100	71	44.62	23,1	11.5	1.37	7.09088E+16	1.28E+12
x705	18.4	50	100	72,5	43.81	25,9	12.5	1.37	1.04212E+17	1.39E+12
MIBC-75g/t	-	-	75	46,8	29,		12.0	yapılmadı	yapılmadı	yapılmadı
MIBC-100gt	-	-	100	68,6	46,6		19.0	1.85	yapılmadı	yapılmadı

*OKOLM=optimum kollektör miktarı, OKÖPM=optimum köpürtücü miktarı, YV=yanabilir verim, AE=ayırma etkinliği, ENT0kül=mekanik taşınmanın olmadığı durumda konsantredeki kül içeriği (agregatlara hapsolan veya bünye külü), α =spesifik kek direnci, R= ortam direnci

KAYNAKLAR

- Akdemir, Ü., Sönmez, İ.,** (2003). Investigation of coal and ash recovery and entrainment in flotation, *Fuel Processing Technology*, 82, 1-9
- Aktaş, Z., Woodburn, E.T.,** (1995). The effect of non-ionic reagent adsorption on the froth structure and flotation performance of two low rank British coals. *Powder Technol.* 83, 149–158.
- Aktaş, Z.,** (2001). Adsorption of non-ionic surface active agent on fine coal and lignite, *Turkish Journal of Chemistry*, 25, 311-321.
- Alam, N., Özdemir, O., Hampton, M. H., Nguyen, A. V.,** (2011). Dewatering of coal plant tailings: Flocculation followed by filtration, *Fuel*, 90, 26–35.
- Angadi, S.I., Jeon, H.S., Nikkam, S.,** (2012). Experimental analysis of solids and water flow to the coal flotation froths, *International Journal of Mineral Processing*, 110-111, 62-70.
- Asmatülü, R.,** (2001). Advanced chemical-mechanical dewatering of fine particles, Doktora Tezi, Material Science and Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Ateşok, G.,** (2009). Kömür Kullanımı ve Teknolojisi, 2.baskı, YMGV Yayınları, İstanbul.
- Ateşok, G., Kangal, M.O.,** (2012). Susuzlandırma ve Kurutma, YMGV Yayınları, İstanbul.
- Banford, A.W., Aktaş, Z., Woodburn, E.T.,** (1998). Interpretation of the effect of froth structure on the performance of froth flotation using image analysis, *Powder Technology*, 98, 61-73.
- Banford, A.W., Aktaş, Z.,** (2004). The effect of reagent addition strategy on the performance of coal flotation, *Minerals Engineering*, 17, 745–760.

- Boylu, F., Laskowski, S. J.,** (2007). Rate of water transfer to flotation froth in the flotation of low-rank coal that also requires the use of oily collector, *International Journal of Mineral Processing*, 83, 125–131
- Burat, F.,** (2003). Küçük boyutlu kömürlerin susuzlandırılmasında titreşim mekanizması ve reaktif ilavesinin etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri, Cevher ve Kömür Hazırlama Programı.
- Cebeci, Y., Sönmez, İ.,** (2006). Application of the Box-Wilson experimental design method for the spherical oil agglomeration of coal Yakup, *Fuel*, 85, 289–297.
- Cho, Y.S., Laskowski, J.S.,** (2002). Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability, *International Journal of Mineral Processing*, 64, 69–80.
- Crawford, R.J., Mainwaring, D.E.,** (2001). The influence of surfactant adsorption on the surface characterisation of Australian coals, *Fuel*, 80, 313–320.
- Çilek, E.C.,** (2009). The effect of hydrodynamic conditions on true flotation and entrainment in flotation of a complex sulphide ore, *International Journal of Mineral Processing*, 90, 35–44
- Dey, S.,** (2012). Enhancement in hydrophobicity of low rank coal by surfactants- A critical overview, *Fuel Processing Technology*, 94, 151–158
- Erol, M., Çolduroğlu, Ç., Aktaş, Z.,** (2003). The effect of reagents and reagent mixtures on froth flotation of coal fines, *International Journal of Mineral Processing*, 71, 131–145.
- George, P., Nguyen, A.V., Jameson, G.J.,** (2004). Assessment of true flotation and entrainment in the flotation of submicron particles by fine bubbles, *Minerals Engineering*, 17, 847–853
- Güney, A., Önal, G., Ergut, Ö.,** (2002). Beneficiation of fine coal by using the free jet flotation system, *Fuel Processing Technology*, 75, 141–150.
- Hacıfazlıoğlu, H.,** (2006). The flotation of bituminous coal slime in mechanical, column and Jameson cell, *Madencilik Dergisi*

- Hacıfazhoğlu, H.,** (2007). Alternatif flotasyon yöntemlerinin tanıtılması, *Madencilik*, 46, 23-41.
- Hacıfazhoğlu, H.,** (2011). Jameson hücresinde bitümlü şlam kömürün flotasyonu için en uygun köpürtücü ve toplayıcı tipinin araştırılması, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 2, 3-9.
- Hassas, B.V.,** (2013). Effect of hydrophilic-lipophilic balance (HLB) of nonionic surfactants on ultrafine lignite dewatering, Bitirme Çalışması, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Jena, M.S., Biswal, S.K., Das, S.P., Reddy, P.S.R.,** (2008). Comparative study of the performance of conventional and column flotation when treating coking coal fines, *Fuel Processing Technology*, 89, 1409–1415.
- Jia, R., Harris, G.H., Fuerstenau, D.W.,** (2000). An improved class of universal collectors for the flotation of oxidized and/or low-rank coal. *International Journal of Mineral Processing*, 58, 99–118.
- Jia, R., Harris, G.H., Fuerstenau, D.W.,** (2002). Chemical reagents for enhanced coal flotation, *Coal Preparation*, 22, 123–149.
- Laskowski, J. S.** (2001b). Coal flotation and fine coal utilization. The University of British Columbia, Vancouver B.C., Canada. 1st Edition, 181.
- Laskowski, J.S.,** (2004). Testing flotation frothers, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 38, 13-22.
- Melo, F., Laskowski, J.S.,**(2007). Effect of frothers and solid particles on the rate of water transfer to the froth, *International Journal of Mineral Processing*
- Moxon, N.T., Keast-Jones, R.,** (1986). The effect of collector emulsification using *International Journal of Mineral Processing*, 18, 21-32.
- Neethling, S.J., Cilliers, J.J.,** (2002). The entrainment of gangue into a flotation froth, *International Journal of Mineral Processing*, 64, 123-134

- Neethling, S.J., Cilliers, J.J.,** (2009). The entrainment factor in froth flotation: Model for particle size and other operating parameter effects, *International Journal of Mineral Processing*, 93, 141-148
- Polat, M., Polat, H., Chander, S.,** (2003). Physical and chemical interactions in coal flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 72(1), 199-213.
- Sarıkaya, M., Bozbayoğlu, G.,** (1995). Flotation characteristics of oxidized coal, *Fuel*, 14, 291-294.
- Savassi, O.N., Alexander, D.J., Franzidis, J.P., Manlapig, E.V.,** (1998). An empirical model for entrainment in industrial flotation plants, *Minerals Engineering*, 11, 243-256.
- Schwarz, S., Grano, S.,** (2005). Effect of particle hydrophobicity on particle and water transport across a flotation froth, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 256, 2–3, 157-164.
- Singh, B.P.,** (1997). The influence of surface phenomena on the dewatering of fine clean coal, *Separation & Filtration*, 34, 159-163.
- Singh, B.P., Besra, L., Reddy, P. S. R., Sengupta, D.K.,** (1998). Use of surfactants to aid the dewatering of fine coal, *Fuel*, 77, 12, 1349-1356.
- Sis, H., Özbayoğlu, G., Sarıkaya, M.,** (2003). Comparison of non-ionic and ionic collectors in the flotation of coal fines, *Minerals Engineering*, 16, 399-401.
- Sönmez, İ., Cebeci, Y.,** (2006). Performance of classic oils and lubricating oils in froth flotation of Ukraine coal, *Fuel*, 85, 1866–1870.
- Tao, D., Parekh, B.K., Liu, J.T., Chen, S.,** (2003). An investigation on dewatering kinetics of ultrafine coal, *International Journal of Mineral Processing*, 70, 235-249.
- Wang, B., Peng, Y.,** (2013). The behaviour of mineral matter in fine coal flotation using saline water, *Fuel*, 109, 309-315.

Warren, L.J., (1985). Determinations of the contributions of true flotation and entrainment in batch flotation tests, *International Journal of Mineral Processing*, 14, 33-44.

Xia, W., Yang, J., Liang, C., (2013). A short review of improvement in flotation of low rank/oxidized coals by pretreatments, *Powder Technology*, 237, 1-8.

Xia, W., Yang, J., (2013). Enhancement in flotation of oxidized coal by oxidized diesel oil and grinding pretreatment, *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 33, 257–265

Yianatos, J., Contreras, F., Díaz, F., Villanueva, A., (2009). Direct measurement of entrainment in large flotation cells, *Powder Technology*, 189, 42-47.

Yu, Q., Ye, Y., Miller, J. (1990). A study of surfactant/oil emulsions for fine coal flotation, *Advances in Fine Particles Processes*, 345-335.

Zheng, X., Franzidis, J.P., Johnson, N.W., Manlapig, E.V., (2005). 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., (2006a). An evaluation of different models of water recovery in flotation, *Minerals Engineering*, 19, 871-882.

Zheng, X., Johnson, N.W., Franzidis, J.P., (2006b). Modelling of entrainment in industrial flotation cells: Water recovery and degree of entrainment, *Minerals Engineering*, 19, (11), 1191-1203

Url-1 <<http://www.dow.com/surfactants/products/octyl.htm>>, alındığı tarih: 17.11.2013

Url-2 < <http://www.enerji.gov.tr/index.php> > alındığı tarih : 10.11.2013

EKLER

EK A: Deney sonuçlarını gösteren çizelgeler

Çizelge A.1 : 50 g/t X-15 sürfaktarıyla yapılan deney sonuçları

MIBC Kons. g/t	Flot. Süre sn	Top. M, %	Ort. Kül %	YV, %	KUV, %	AE, %	SU KAZANIMI		
							gr	Ra, %	Rw %
0							58.7	3.8	2.35
	60	8.3	36.61	9.0	92.7	1.7	115.5	7.3	4.62
	120	16.1	36.63	17.5	85.8	3.3	238.9	14.2	9.56
	180	23.1	36.02	25.3	80.0	5.3	355.1	20.0	14.20
	240	28.0	35.13	31.1	76.4	7.5	434.4	23.6	17.38
12.5	30	4.5	27.63	5.7	97.1	2.8	49.2	2.9	1.97
	60	10.2	29.50	12.6	93.0	5.6	122.9	7.0	4.92
	120	18.7	29.93	22.9	87.0	9.9	229.1	13.0	9.16
	180	26.1	29.76	32.1	81.9	14.0	326.5	18.1	13.06
	240	33.3	30.27	40.7	76.5	17.2	433.2	23.5	17.33
25.0	30	6.5	21.74	8.7	96.6	5.3	66.2	3.4	2.65
	60	12.8	24.44	16.6	92.5	9.1	143.6	7.5	5.74
	120	25.1	26.22	31.7	84.2	16.0	287.4	15.8	11.50
	180	33.4	25.91	42.5	79.3	21.7	374.9	20.7	14.99
	240	41.4	25.70	52.8	74.5	27.3	461.0	25.5	18.44
50.0	30	12.8	13.85	18.7	95.7	14.4	77.0	4.3	3.08
	60	20.6	18.44	28.6	90.8	19.4	155.7	9.2	6.23
	120	30.9	19.91	42.1	85.1	27.2	247.5	14.9	9.90
	180	39.7	21.26	53.2	79.5	32.7	338.3	20.5	13.53
	240	45.7	22.23	60.5	75.3	35.9	413.5	24.7	16.54
75.0	30	39.6	13.25	57.9	87.1	45.0	171.7	12.9	6.87
	60	50.6	14.76	72.7	81.6	54.4	259.9	18.4	10.40
	120	58.4	17.80	81.0	74.5	55.4	380.5	25.5	15.22
	180	63.0	20.48	84.4	68.3	52.7	501.5	31.7	20.06
100.0	30	37.4	13.57	54.5	87.6	42.0	175.3	12.4	7.01
	60	47.4	15.84	67.3	81.6	48.9	271.2	18.4	10.85
	120	56.1	19.22	76.5	73.5	50.1	409.7	26.5	16.39
	180	60.5	21.34	80.3	68.3	48.6	515.1	31.7	20.60
	240	63.8	23.09	82.9	63.8	46.7	605.4	36.2	24.21

Çizelge A.2 : 50 g/t X-45 sürfaktanıyla yapılan deney sonuçları

MIBC Kons. g/t	Flot. Süre sn	Top. M, %	Ort. Kül %	YV, %	KUV, %	AE, %	SU KAZANIMI		
							gr	Ra, %	Rw %
25.0	30	6,3	32,23	7,3	95,1	2,4	78,4	4,9	3,136
	60	11,8	32,19	13,6	90,9	4,5	146,5	9,1	5,86
	120	19,5	32,34	22,5	84,8	7,3	249,1	15,2	9,964
	180	25,9	32,47	29,8	79,7	9,5	341,2	20,3	13,648
	240								
50.0	30	9,1	23,60	11,8	94,8	6,6	80,9	5,2	3,236
	60	17,4	27,58	21,5	88,4	9,9	187,3	11,6	7,492
	120	27,8	29,02	33,6	80,5	14,1	321,8	19,5	12,872
	180	36,5	29,70	43,7	73,7	17,5	450,4	26,3	18,016
	240								
75.0	30	13,7	16,53	19,6	94,5	14,1	99,5	5,5	3,98
	60	22,5	18,91	31,2	89,7	20,9	191,8	10,3	7,672
	120	33,1	22,22	44,0	82,2	26,2	330,6	17,8	13,224
	180	41,3	24,63	53,2	75,5	28,6	453,2	24,5	18,128
	240	47,0	25,61	59,8	70,9	30,7	534,7	29,1	21,388
100.0	30	24,6	15,63	35,1	90,6	25,7	143,3	9,4	5,7312
	60	38,3	17,54	53,3	83,6	36,9	258,8	16,4	10,35
	120	47,7	20,21	64,3	76,4	40,7	384,8	23,6	15,3904
	180	52,6	22,14	69,3	71,5	40,7	493,7	28,5	19,7492
	240	57,2	23,92	73,5	66,5	40,0	597,5	33,5	23,9012

Çizelge A.3 : 50 g/t X-114 sürfaktanıyla yapılan deney sonuçları

MIBC Kons. g/t	Flot. Süre sn	Top. M, %	Ort. Kül %	YV, %	KUV, %	AE, %	SU KAZANIMI		
							gr	Ra, %	Rw %
25.0	30	8,9	36,64	9,7	92,3	2,0	98,5	7,7	3,94
	60	13,0	34,99	14,6	89,2	3,8	156,3	10,8	6,252
	120	19,2	33,92	21,9	84,5	6,5	239,0	15,5	9,56
50.0	30	12,8	15,59	18,1	95,1	13,2	74,4	4,9	2,9764
	60	19,7	19,14	26,7	90,7	17,4	143,5	9,3	5,7412
	120	27,1	21,91	35,5	85,3	20,8	230,6	14,7	9,2224
	180	32,4	23,10	41,9	81,5	23,4	293,0	18,5	11,7196
75.0	30	46,0	15,23	66,8	83,2	50,0	209,7	16,8	8,3872
	60	54,4	17,59	76,9	77,0	53,9	317,4	23,0	12,6976
	120	60,2	20,12	82,5	70,9	53,5	431,8	29,1	17,2736
100.0	180	64,1	22,81	84,8	64,9	49,8	563,5	35,1	22,5416
	30	15,6	18,63	21,7	93,1	14,8	106,6	6,9	4,264
	60	23,0	19,74	31,7	89,1	20,8	167,1	10,9	6,684
	120	34,8	22,27	46,4	81,4	27,8	290,0	18,6	11,6
180		44,0	24,76	56,8	73,9	30,7	411,0	26,1	16,4396

Çizelge A.4 : 50 g/t X-102 sürfaktarıyla yapılan deney sonuçları

MIBC Kons. g/t	Flot. Süre sn	Top. M, %	Ort. Kül %	YV, %	KUV, %	AE, %	SU KAZANIMI		
							gr	Ra, %	Rw %
25.0	30	4,1	29,62	5,0	97,1	2,1	49,4	2,9	1,976
	60	7,0	29,01	8,6	95,1	3,7	82,3	4,9	3,292
	120	11,8	28,95	14,4	91,8	6,3	135,3	8,2	5,412
	180	15,5	28,90	18,9	89,3	8,2	173,7	10,7	6,948
50.0	30	12,8	18,22	17,7	94,3	12,1	95,1	5,7	3,804
	60	18,4	20,30	24,9	90,9	15,8	159,3	9,1	6,372
	120	24,5	21,74	32,5	87,0	19,6	225,4	13,0	9,016
	180	30,3	22,66	39,8	83,3	23,1	287,1	16,7	11,484
75.0	30	28,4	15,34	41,2	89,5	30,7	145,6	10,5	5,824
	60	40,7	15,99	58,5	84,3	42,8	232,0	15,7	9,28
	120	51,5	18,63	72,5	78,1	50,5	336,5	21,9	13,46
	180	56,5	19,74	76,9	72,2	49,0	452,0	10,9	6,684
100.0	30	33,9	14,87	49,2	87,8	37,0	163,8	12,2	6,552
	60	49,1	16,04	70,3	80,9	51,3	264,7	19,1	10,588
	120	59,8	18,05	83,6	73,9	57,5	356,2	26,1	14,248
	180	65,5	20,85	88,4	67,0	55,4	474,3	33,0	18,972

Çizelge A.5 : 50 g/t X-100 sürfaktarıyla yapılan deney sonuçları

MIBC Kons. g/t	Flot. Süre sn	Top. M, %	Ort. Kül %	YV, %	KUV, %	AE, %	SU KAZANIMI		
							gr	Ra, %	Rw %
25.0	30	5,1	31,31	6,0	96,1	2,1	64,8	3,9	2,59
	60	9,4	31,31	10,9	92,8	3,7	126,4	7,2	5,054
	120	15,3	31,31	17,8	88,3	6,1	217,5	11,7	8,698
	180	19,7	31,19	22,9	85,0	7,9	278,8	15,0	11,1516
50.0	30	7,5	27,05	9,6	95,2	4,8	87,9	4,8	3,516
	60	12,4	26,63	15,9	92,3	8,2	147,2	7,7	5,888
	120	19,5	27,64	24,7	87,4	12,1	242,9	12,6	9,7144
	180	25,9	27,41	32,9	83,4	16,3	324,0	16,6	12,9604
75.0	30	10,1	23,82	13,0	94,2	7,2	107,1	5,8	4,284
	60	17,8	26,01	22,4	88,7	11,1	206,8	11,3	8,272
	120	26,8	26,92	33,3	82,4	15,7	331,0	17,6	13,24
	180	32,3	26,98	40,1	78,8	18,8	400,1	21,2	16,004
	240	38,7	27,62	47,6	74,0	21,5	501,5	26,0	20,06
100.0	30	20,1	17,16	29,0	91,9	20,9	139,2	8,1	5,5676
	60	28,9	17,02	41,7	88,4	30,1	196,4	11,6	7,854
	120	41,2	19,45	57,7	81,1	38,9	329,4	18,9	13,1776
	180	47,3	21,09	64,8	76,5	41,4	425,2	23,5	17,0088

Çizelge A.6: 50 g/t X-165 sürfaktarıyla yapılan deney sonuçları

MIBC Kons. g/t	Flot. Süre sn	Top. M, %	Ort. Kül %	YV, %	KUV, %	AE, %	SU KAZANIMI		
							gr	Ra, %	Rw %
25.0	30	2,8	32,60	3,2	97,7	0,9	41,4	2,3	1,656
	60	5,5	33,08	6,2	95,5	1,7	88,1	4,5	3,524
	120	11,4	35,17	12,4	90,1	2,4	175,4	9,9	7,016
	180	16,9	35,72	18,2	85,0	3,2	267,5	15,0	10,7
50.0	30	7,5	32,79	8,8	94,2	3,0	94,1	5,8	3,764
	60	12,9	32,76	15,1	90,1	5,2	171,5	9,9	6,86
	120	20,1	32,22	23,7	84,9	8,6	264,2	15,1	10,568
	180	27,4	32,60	32,2	79,1	11,3	376,6	20,9	15,064
75.0	30	9,4	18,92	12,8	95,6	8,4	78,5	4,4	3,14
	60	15,9	22,02	20,9	91,4	12,3	159,6	8,6	6,384
	120	26,5	25,68	33,2	83,2	16,4	296,6	16,8	11,8652
	180	33,4	26,20	41,5	78,5	19,9	392,1	21,5	15,6852
	240	40,0	27,99	48,5	72,4	20,9	493,0	27,6	19,7212
100.0	30	18,9	16,40	26,7	92,4	19,1	115,0	7,6	4,6
	60	28,2	17,80	39,2	87,7	27,0	192,2	12,3	7,6884
	120	37,6	20,70	50,5	81,0	31,5	313,2	19,0	12,5276
	180	45,4	23,73	58,7	73,7	32,4	454,5	26,3	18,1788
	240	51,0	25,84	64,1	67,8	31,9	572,2	32,2	22,8888

Çizelge A.7: 50 g/t X-305 sürfaktarıyla yapılan deney sonuçları

MIBC Kons. g/t	Flot. Süre sn	Top. M, %	Ort. Kül %	YV, %	KUV, %	AE, %	SU KAZANIMI		
							gr	Ra, %	Rw %
25.0	30	3,4	32,05	3,9	97,3	1,2	45,2	2,7	1,8076
	60	6,9	32,17	7,9	94,5	2,5	93,0	5,5	3,7212
	120	13,5	33,19	15,2	89,0	4,2	185,8	11,0	7,4332
	180	19,5	32,55	22,2	84,4	6,6	276,7	15,6	11,0668
	240	23,9	32,67	27,1	80,8	8,0	345,9	19,2	13,834
50.0	30	6,2	22,83	7,9	96,4	4,3	71,5	3,6	2,8588
	60	11,3	25,34	13,9	92,8	6,7	138,3	7,2	5,5328
	120	16,7	26,86	20,2	88,6	8,8	223,4	11,4	8,9352
	180	22,3	27,30	26,8	84,6	11,4	296,1	15,4	11,8428
	240	30,0	27,83	35,8	78,8	14,6	380,6	21,2	15,2224
75.0	30	13,2	15,33	18,9	95,1	14,0	84,0	4,9	3,3592
	60	20,7	15,78	29,6	92,0	21,6	139,1	8,0	5,5632
	120	30,4	19,07	41,7	85,9	27,6	244,9	14,1	9,7964
	180	36,3	20,35	49,0	82,0	31,0	318,4	18,0	12,7344
100.0	30	21,6	13,71	31,3	92,7	23,9	105,9	7,3	4,2356
	60	33,6	15,07	48,0	87,5	35,4	198,8	12,5	7,9516
	120	42,3	16,73	59,1	82,5	41,6	304,5	17,5	12,1816
	180	48,4	18,21	66,4	78,2	44,6	386,3	21,8	15,4536
	240	53,4	19,88	71,8	73,7	45,6	470,3	26,3	18,8116

Çizelge A.8: 50 g/t X-705 sürfaktarıyla yapılan deney sonuçları

MIBC Kons. g/t	Flot. Süre sn	Top. M, %	Ort. Kül %	YV, %	KUV, %	AE, %	SU KAZANIMI		
							gr	Ra, %	Rw %
25.0	30	5,3	34,72	5,8	95,5	1,4	70,0	4,5	2,8
	60	10,0	35,00	11,0	91,5	2,5	143,0	8,5	5,72
	120	17,9	34,76	19,8	84,8	4,6	264,0	15,2	10,56
	180	23,2	34,35	25,7	80,6	6,3	353,0	19,4	14,12
	240								
50.0	30	7,2	30,56	8,6	94,7	3,3	100,0	5,3	4
	60	12,4	29,03	15,1	91,4	6,5	160,0	8,6	6,4
	120	21,1	29,61	25,6	85,0	10,6	270,0	15,0	10,8
	180	28,4	29,59	34,3	80,0	14,3	364,0	20,0	14,56
	240	35,1	30,09	42,1	74,8	16,9	467,0	25,2	18,68
75.0	30	11,4	17,35	15,9	95,1	11,0	86,0	4,9	3,44
	60	19,7	19,96	26,6	90,3	16,9	171,0	9,7	6,84
	120	29,0	22,14	38,1	84,2	22,3	289,0	15,8	11,56
	180	36,8	23,91	47,2	78,4	25,6	389,0	21,6	15,56
	240	46,6	26,77	57,6	69,3	26,9	559,0	30,7	22,36
100.0	30	21,2	15,02	31,1	92,4	23,5	110,0	7,6	4,4
	60	34,3	16,29	49,6	86,7	36,3	193,0	13,3	7,72
	120	46,5	19,26	64,7	78,7	43,4	327,0	21,3	13,08
	180	54,0	22,29	72,5	71,4	43,8	470,0	28,6	18,8
	240	60,1	25,40	77,4	63,7	41,1	641,0	36,3	25,64

Çizelge A.9: Yalnızca köpürtücü MIBC ile yapılan deney sonuçları

MIBC Kons. g/t	Flot. Süre sn	Top. M, %	Ort. Kül %	YV, %	KUV, %	AE, %	SU KAZANIMI		
							gr	Ra, %	Rw %
75.0	30	10,1	18,19	14,1	95,5	9,7	80,7	4,5	3,228
	60	15,5	19,01	21,4	92,9	14,3	123,9	7,1	4,956
	120	24,4	20,52	33,0	87,9	20,9	206,4	12,1	8,256
	180	30,3	20,85	40,9	84,7	25,6	254,3	15,3	10,172
	240	34,7	20,97	46,8	82,4	29,1	288,6	17,6	11,544
	300	39,2	21,37	52,4	79,7	32,2	328,9	20,3	13,156
100.0	30	19,9	15,77	28,0	92,2	20,3	104,7	7,8	4,188
	60	32,2	15,56	45,6	87,6	33,2	161,1	12,4	6,444
	120	44,6	16,42	62,5	81,8	44,3	232,5	18,2	9,3
	180	49,8	17,83	68,6	78,0	46,6	287,9	22,0	11,516
	240	53,8	19,03	73,0	74,6	47,6	337,0	25,4	13,48
	300	57,1	20,09	76,4	71,6	48,0	383,7	28,4	15,348

Çizelge A.10: 75 g/t motorin ile yapılan deney sonuçları

MIBC Kons. g/t	Flot. Süre sn	Top. M, %	Ort. Kül %	YV, %	KUV, %	AE, %	SU KAZANIMI		
							gr	Ra, %	Rw %
25.0	30	9,1	17,20	12,9	96,2	9,1	54,8	3,8	2,192
	60	16,5	21,39	22,1	91,5	13,7	123,1	8,5	4,924
	120	25,8	24,17	33,4	85,0	18,5	221,5	15,0	8,86
	180								
50.0	30	22,7	17,04	32,1	90,7	22,8	130,7	9,3	5,228
	60	31,0	20,00	42,3	85,1	27,4	222,1	14,9	8,884
	120	38,1	21,21	51,2	80,5	31,7	299,9	19,5	11,996
	180								
75.0	30	39,0	13,85	57,7	87,1	44,7	145,0	12,9	5,8
	60	49,6	14,58	72,6	82,7	55,3	202,9	17,3	8,116
	120	56,7	16,39	81,4	77,7	59,1	268,6	22,3	10,744
	180	61,1	18,17	85,7	73,4	59,2	329,9	26,6	13,196
100.0	30	45,4	14,76	65,0	83,4	48,4	169,2	16,6	6,768
	60	59,8	15,82	84,5	76,6	61,1	270,9	23,4	10,836
	120	66,9	18,22	91,9	69,9	61,7	375,2	30,1	15,008
	180	70,3	20,22	94,1	64,9	59,0	462,2	35,1	18,488
	240	72,8	21,82	95,5	60,8	56,3	488,7	39,2	19,548

Çizelge A.11: 75 g/t Kerosen ile yapılan deney sonuçları

MIBC Kons. g/t	Flot. Süre sn	Top. M, %	Ort. Kül %	YV, %	KUV, %	AE, %	SU KAZANIMI		
							gr	Ra, %	Rw %
25.0	30	8,3	17,95	11,7	96,4	8,2	62,4	3,6	2,496
	60	15,1	19,70	20,8	92,9	13,7	124,9	7,1	4,996
	120	21,8	21,29	29,5	89,0	18,4	180,5	11,0	7,22
	180								
50.0	30	29,8	17,13	42,4	87,8	30,2	119,4	12,2	4,776
	60	35,4	18,12	49,8	84,7	34,4	164,2	15,3	6,568
	120	41,4	19,52	57,2	80,7	37,8	231,3	19,3	9,252
	180								
75.0	30	43,7	13,88	64,4	85,4	49,7	159,6	14,6	6,384
	60	51,3	14,33	75,1	82,3	57,4	205,5	17,7	8,22
	120	59,9	17,04	84,9	75,4	60,3	306,3	24,6	12,252
	180	64,8	19,60	89,1	69,4	58,5	399,4	30,6	15,976
	240	69,3	22,14	92,2	63,1	55,3	505,5	36,9	20,22
100.0	30	48,8	13,83	72,3	83,9	56,3	189,5	16,1	7,58
	60	58,4	15,17	85,2	78,9	64,1	260,3	21,1	10,412
	120	64,2	17,92	90,7	72,6	63,3	363,7	27,4	14,548
	180	67,6	20,39	92,7	67,1	59,8	470,8	32,9	18,832
	240	70,3	22,35	94,0	62,5	56,5	566,4	37,5	22,656

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Zeynep Yeşilyurt

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 1984

E-Posta: yesilyurtz@itu.edu.tr

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği, 2011

YAYINLAR/ BİLDİRİLER

- Boylu F., Sarioğlu S., Kökkılıç, O., Yeşilyurt, Z., Use of falcon enhanced gravity separator for effective fine coal processing, *XIII. International Mineral Processing Symposium*, October 10-12, 2012, Bodrum, Turkey.