

Araştırma Makalesi – Research Article

Sentetik Polimerlerin Flokülasyonda Verimliliğini Etkileyen Faktörler*

Factors Affecting Efficiency of Synthetic Polymers in Flocculation

Noyan Akray¹, Tayfun Şengül^{2*}

Geliş / Received: 21/07/2022

Revize / Revised: 07/09/2022

Kabul / Accepted: 08/09/2022

ÖZ

Polimerler endüstriyel atıkların katı sıvı ayrımında yaygın bir şekilde kullanılan etkili ürünlerdir. Atıklarda katı-sıvı ayrımının yapılması, atıkların daha düzenli ve kolay depolanabilmesini sağlamanın yanında, yüksek su içeriğinin depolama sahasından uzaklaştırılması depolanan atıkları çevreye tehdit olmaktan çıkararak atık hacmini önemli bir miktarda düşürerek depolanma maliyetlerini azaltır. Polimer performansı bulanıklık deneyleri ile ölçülmektedir. Katı sıvı ayrımında kullanılan polimerlerin etkinliğini, karıştırma hızı, karıştırma süresi, çökeltme süresi, sıcaklık ve katı formdaki polimerin sıvı çözelti halinde hazırlandıktan sonra kullanılmaları arasında geçen depolama süresi gibi birçok faktör etkilemektedir. Bu deneysel çalışmada, endüstriyel bir atığı temsilen Kütahya Espey bor zenginleştirme (konsantratör) tesisinin atık barajından doğal haliyle temin edilen atık önce kurutulmuş daha sonra atık barajındaki su/zemin oranı dikkate alınarak atık zemin süspansiyonu hazırlanmıştır. Hazırlanan atık zemin süspansiyonuna moleküler ağırlıkları farklı dört anyonik polimer belirli bir oranda karıştırılarak katı-sıvı ayrımında polimer performansını etkileyen faktörler belirlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, ideal karıştırma hızının 200-250 dev/dk, karıştırma süresinin 1-3 dakika, süspansiyonun çökeltme süresinin 2-4 dk aralığında olduğu, polimer türüne göre süspansiyon sıcaklığının bulanıklık ve flokülasyonu etkileyebilecek bir faktör olduğu, polimer çözeltisi hazırlandıktan 24 saat sonra 7 gün süreyle etkinliğinde bir azalma olmadan kullanılabileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler- Anyonik Polimer, Endüstriyel Atık, Flokülasyon, Bulanıklık, Jar Deneyi

ABSTRACT

Polymers are effective products widely used in the solid-liquid separation of industrial wastes. Making solid-liquid separation in the wastes ensures that the wastes can be stored more regularly and efficiently, while removing the high water content from the landfill makes the accumulated wastes not a threat to the environment and reduces the waste volume by a significant amount, thus reducing the storage costs. Polymer performance is measured by turbidity tests. Many factors affect the effectiveness of the polymers used in solid-liquid separation, such as mixing speed, mixing time, settling time of slurry, temperature, and storage time which is the time elapsed between the use of the solid polymer after it has been prepared as a liquid solution. In this experimental study, the waste obtained from the tailings dam of the Kütahya Espey boron enrichment (concentrator) plant in its natural form, representing an industrial waste, was first dried, and then a waste ground suspension was prepared by taking the

*Bu makale, Noyan Akray'ın, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında, Dr.Öğr.Üyesi Tayfun Şengül danışmanlığında yapmış olduğu, "Endüstriyel Bir Atığın Geotekstil Tüp Kullanılarak Susuzlaştırılması ve Depolanması" (2022) başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

¹İletişim: noyan.akray@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-6640-4727>)

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Evliya Çelebi Yerleşkesi, 43100 Merkez/Kütahya, Türkiye

^{2*}Sorumlu yazar iletişimi: tayfun.sengul@dpu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-3473-7724>)

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Evliya Çelebi Yerleşkesi, 43100 Merkez/Kütahya, Türkiye

water/soil ratio in the tailings dam into account. The factors affecting the polymer performance in solid-liquid separation were determined by mixing four anionic polymers with different molecular weights into the prepared soil suspension. According to the findings, the ideal mixing speed has been determined to be 200-250 rpm, the mixing time as 1-3 minutes, and the settling time of the suspension between 2-4 minutes. Also, the suspension temperature was found to be a factor that could affect the turbidity and flocculation according to the polymer type. Moreover, the polymer solution can be used for 7 days without a decrease in its effectiveness, 24 hours after it is prepared.

Keywords- Anionic Polymer, Industrial Waste, Flocculation, Turbidity, Jar Test

I. GİRİŞ

Nüfus artışı ve gelişen teknoloji, hızla artan üretimi de beraberinde getirmiştir. Çağımızda üretimin merkezi fabrikalardır ve arza karşılık verebilmek için her geçen gün kapasiteleri arttırılmaktadır. Üretim kapasitesi artan fabrikaların atığı da artmakta ve atıkların depolanacağı yer arayışları hızlanmaktadır. Sadece küresel madencilik sektörünün her yıl ürettiği endüstriyel atık miktarı milyarlarca tonu bulurken 2014 yılında üretilen atık miktarının 14 milyar ton olduğu tahmin edilmektedir [1]. Endüstriyel atıklar genellikle ağır metal ihtiva ettiklerinden atık barajlarında depolanma mecburiyeti bulunmaktadır.

Katı dane oranı %5-15 arasında değişen sulu formdaki endüstriyel atıklar borularla atık barajlarına taşınmaktadır. Endüstriyel atıklar herhangi bir katı sıvı ayırma işlemine tabi tutulmadıklarında ortamdaki suyun katı danelerden ayrışması çok uzun süren bir süreç olduğundan, atık barajlarında atık zeminin depolanması beraberinde yüksek miktarda suyu da depolamak ve bunun için birden fazla atık barajı inşa etmek anlamına gelmektedir. Daha fazla atık barajına gereksinim duymak yüksek maliyetinin yanında baraj kazası riskini de arttırmaktadır. Sismik olaylar ve aşırı su seviyesi baraj kazalarına sebep olabilmekte ve tarım arazilerine atık suyun sızma ihtimali çevresel bir tehdit oluşturmaktadır. Dünya genelinde 2000 yılından sonra 74 büyük atık barajı kazası rapor edilirken, atık barajı kazası oluşma sıklığı her geçen gün artmaktadır. Bu atık barajı kazalarında 858 can kaybının yanında 153 kayıp insan olmasından dolayı can kaybının çok daha yüksek olduğu tahmin edilmektedir. Ayrıca tarım arazileri ve içme suyu kaynaklarının kullanılamaz hale gelmesinin yanında, yerleşim alanlarında meydana getirdiği zararın milyarlarca dolar olduğu bilinmektedir [2].

Atık zeminin büyük oranda sudan ayrıştırılıp depolanması ise daha emniyetli ve düşük maliyetli bir depolama yöntemidir. Zemini sudan ayıracak teknoloji günümüzde birçok yerde başarı ile uygulanmaktadır. Su içerisindeki serbest zemin partikülleri topaklayıcı polimerler yardımı ile bir araya getirilerek doğal tane boyutuna göre boyutları onlarca kat artan yapılar hızlı bir şekilde çöktürebilmektedir. Sudan kesin bir şekilde ayrılan atık zeminin hacminde önemli bir miktarda azalma meydana gelmesinin yanında depolanan atık zemin yeri geldiğinde tekrar kullanılma imkânına sahip olabilmektedir.

Katı sıvı ayırımında polimer performansını ölçmenin en etkili yolu atık zemin süspansiyonunun bulanıklığının ölçülmesidir. Polimer eklenen atık zemin süspansiyonunda serbest zemin partikülleri ne kadar az bulunuyorsa süspansiyonun bulanıklık değeri o kadar düşük ölçülmektedir ki bu polimerin atık zemini topaklaştırma performansının bir göstergesidir.

Zemin suyunun bulanıklığını ve aynı zamanda kullanılan polimerin katı sıvı ayırımında etkinliğinin belirlenmesi için jar test (bulanıklık deneyi) yaygın bir şekilde uygulanan bir deney yöntemidir [3-5]. Buna rağmen bu deney yönteminde sonuca etki eden süspansiyonun karıştırma hızı, karıştırma süresi ve çökeltme süresi gibi faktörler araştırmacılar tarafından farklı uygulanabilmektedir.

Satyamurthy ve Bhatia [6] düşük plastisiteli siltli zeminden (ML) oluşan, beş farklı konsantrasyon oranında katı tane içeren süspansiyonun katı sıvı ayırımı için anyonik flokülant kullanarak jar deneyleri yürütmüşlerdir. Bu deneylerde 50-200 rpm karıştırma hızlarında süspansiyon 5 dk süreyle karıştırılmıştır.

Sher ve diğ. [7] polimer endüstrisinin ürettiği önemli miktardaki atık suyun suyollarına bırakılmadan önce artılması üzerine yürüttükleri araştırmada, katı tanelerin çöktürülmesinde flokülasyon işlemi uygulanmıştır. Bu maksatla yürütülen jar deneylerinde anyonik poliakrilamid (Magnafloc155) flokülant olarak kullanılmıştır. Flokülasyon deneylerinde 5 dakika boyunca 40 rpm'de yavaş karıştırma yöntemi benimsenmiş, deneylerde süspansiyonun çökeltmesi için 30 dakika beklenilmiştir.

Tassinari ve diğ. [8] farklı konsantrasyonlarda kaolin süspansiyonu ile gerçekleştirdikleri deneylerde, 200 rpm yüksek karıştırma hızında 2 dk daha sonra 30 rpm düşük karıştırma hızında 5 dk süspansiyonu karıştırdıktan sonra, süspansiyonun çökmesine 5 dk müsaade edilip zamanın bir fonksiyonu olarak sürekli bulanıklık değerleri ölçülmüştür.

Araştırmacıların yürüttükleri çalışmalarda genel olarak katı sıvı ayırımında etkili polimer ve dozu belirlendiği için jar deneylerinde belirli bir karıştırma hızı, karıştırma ve çökme süresi tüm deneylerde sabit olarak uygulanmaktadır. Buna rağmen karıştırma hızı, karıştırma ve çökme sürelerinin flokülasyona olan etkisini belirlemeye yönelik çalışmalar oldukça kısıtlıdır [5].

Bu çalışmada Kütahya Espey bor zenginleştirme (konsantratör) tesisinin atık barajından temin edilen kütülecce %15 katı daneden oluşan endüstriyel bir atık zeminin farklı yük yoğunluğuna sahip anyonik iyon yüklü sentetik polimerler kullanılarak çökeltmesinde polimer verimliliğine etki eden faktörlerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu maksatla etkili polimer tipi ve dozunun belirlendiği jar deneylerinde süspansiyonun optimum karıştırma hızının, karıştırma ve çökme sürelerinin, ortam sıcaklığının ve polimerlerin etkili kullanım sürelerinin flokülasyon ve dolayısıyla süspansiyonun bulanıklık değerine etkisi araştırılmıştır.

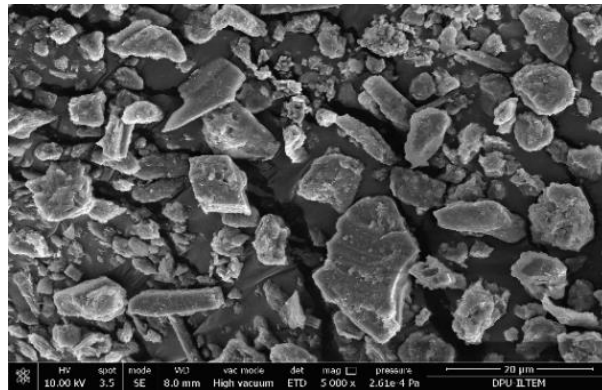
II. MALZEME

A. Atık Zemin

Bor üretimi için açık ocaklardan çıkarılan kolemanit cevheri fiziksel zenginleştirme yapılarak konsantrasyon kolemanit üretilmektedir. Daha sonra elde edilen bu ürün istenilen boyutlarda öğütülerek, reaksiyon, filtrasyon, kristalizasyon ve kurutma gibi çeşitli üretim aşamalarından geçirilerek borik asite dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm sırasında atık zeminler oluşmaktadır. Bu deneysel çalışmada endüstriyel atık zemini temsilen Kütahya Espey bor zenginleştirme tesisinin atık barajından temin edilen atık zemin kullanılmıştır. Bu atık zeminin X-Ray Floresans (XRF) spektroskopisi ile belirlenen kimyasal analiz sonuçları Tablo 1’de, taramalı elektron mikroskopun ikincil elektron modu ile 5000 kat büyütülmüş mikro yapı görüntüsü (SEM-SE) Şekil 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. XRF deneyi sonuçları

Oksit	(%)	Oksit	(%)		
1	SiO ₂	28,18	9	SO ₃	0,39
2	CaO	20,40	10	TiO ₂	0,37
3	Al ₂ O ₃	7,74	11	Na ₂ O	0,24
4	MgO	6,74	12	P ₂ O ₅	0,18
5	F ₂ O	3,50	13	Cs ₂ O	0,13
6	K ₂ O	3,22	14	MnO	0,07
7	SrO	1,66	15	Cl	0,06
8	As ₂ O ₃	0,46			



Şekil 1. Bor zenginleştirme atık zemininin taramalı elektron mikroskop fotoğrafı

Bu deneysel çalışmada kullanılan atık zeminin dane boyutu dağılımını belirlemek amacı ile ASTM D6913-04’e [9] göre elek analizi, D7928-17’e [10] göre hidrometre analizi gerçekleştirilmiştir. Dane boyutu dağılımına göre belirlenen zemin yüzdeleri ve zeminin fiziksel özellikleri Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2. Zemin fiziksel özellikleri

Çakıl %	Kum %	Silt %	Kil %	Spesifik Gravite (G _s)	Likit Limit (LL) %	Plastisite İndisi (PI) %
0,2	46,2	20,6	33,0	2,5	37,5	15,0

Elde edilen bu sonuçlara göre atık zemin %46,2 oranında kum ve %53,6 oranında ince daneli zeminden oluştuğu ayrıca %0,2 civarında çakıl içerdiği, birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre düşük plastisiteli inorganik killer ve siltli killer (CL) grubunda olduğu belirlenmiştir.

B. Polimer

Polimerler, katıldıkları bulamaçta zemin tanelerini elektriksel çekim kuvveti etkisi ile birbirlerine bağlayıp taneler arası fiziksel bir köprü oluşturarak topaklaştıran, doğal tane boyutuna göre onlarca kat daha büyük bir kütle halinde oluşan bu topakların çökmesini hızlandırarak suyun ayrışmasını sağlayan doğal veya sentetik kimyasallardır. Bu çalışma için, iyon durumuna göre anyonik, molekül ağırlıklarına göre çok yüksek molekül ağırlıklı, beyaz, renksiz ve suda çözünabilir polimerler üreticiden kuru toz formda temin edilmiştir. Bu polimerler %0,25 konsantrasyonda 2500 ppm sulu çözelti haline getirilerek 24 saat bekletildikten sonra homojen olması sağlanarak deneylerde kullanılmıştır. Kullanılan polimerlerin özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Polimer özellikleri

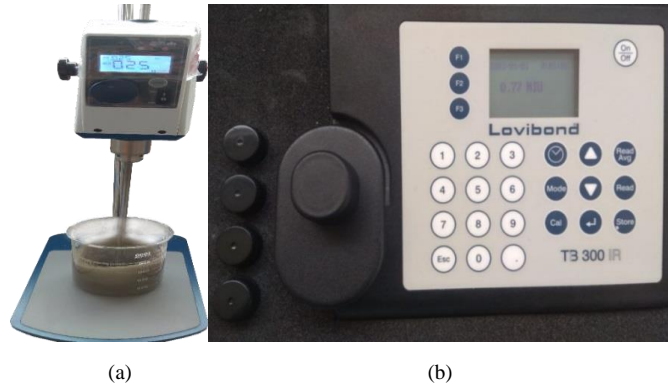
Polimer Kodu	Yük yoğunluğu	Moleküler kütle	Yoğunluk (g/cm ³)	Fiziksel form
913	Düşük	Çok yüksek	0,80	Beyazımsı granüler toz
923	Orta	Çok yüksek	0,80	Beyazımsı granüler toz
934	Orta	Çok yüksek	0,80	Beyazımsı granüler toz
956	Yüksek	Çok yüksek	0,80	Beyazımsı granüler toz

III.YÖNTEM

Bulanıklık deneyi, süspansiyonun bulanıklık değerinin 20 NTU (Nefelometrik Bulanıklık Birimi) limit bulanıklık değerinin altına düşmesini sağlayan en düşük polimer dozunun ve etkili polimer tipinin belirlendiği basit bir deney yöntemidir. Bulanıklık deneyleri ASTM D2035-19 [11] uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Atık barajlarına depolanmak üzere borularla taşınan endüstriyel atık süspansiyonlarında katı dane oranı kütlece yaklaşık %5-15 civarında olması nedeniyle bulanıklık deneyleri 1000 ml'lik standart deney kaplarında, ağırlıkça %15'i zemin olacak şekilde 500 ml atık zemin bulamacı hazırlanarak yapılmıştır. Atık zemin bulamacı, 82,40 gr katı atık, 467,07 gr saf su ile hazırlanmış ve Şekil 2.(a)'da gösterilen mekanik karıştırıcı kullanılarak 2 dakika süreyle karıştırılmıştır. Daha sonra farklı yük yoğunluğuna sahip anyonik iyon yüklü homojen bir şekilde hazırlanan polimerler zemin bulamaçlarına her aşamada 10 ppm (2 ml) olacak şekilde 120 ppm'e kadar eklenerek tekrar mekanik karıştırıcıda karıştırılmıştır.

Polimer ilave edilen süspansiyon karıştırıldıktan sonra zemin tanelerinin çökmesi için beklenmiş ve çökelen zemin seviyesi ile su yüzeyi arasında kalan bölgenin yaklaşık ortasından şırınga yardımıyla süzüntü suyu (supernatant) örnekleri alınarak nefelometre adı verilen bulanıklık ölçme cihazında (Şekil 2.(b)) süspansiyonun bulanıklık değeri NTU cinsinden belirlenmiştir. Bulanıklık çözünmüş, çökmüş ya da askıda kalan tanecik yapılı organik yahut inorganik maddelerin çözelti içerisinde ışığı dağıtması veya yansıtmasına bağlı olarak solüsyonun berraklığı olarak tanımlanmaktadır. Daha sonra, bulanıklık değeri ölçülen süzüntü su numuneleri deney kabına boşaltılarak, bulanıklık deneyi tekrarlı bir şekilde devam ettirilmiştir.



Şekil 2. Mekanik karıştırıcı ve bulanıklık ölçer a) Mekanik karıştırıcı b) Bulanıklık ölçer

IV. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

A. Etkili Polimer Tipi ve Dozunun Belirlenmesi

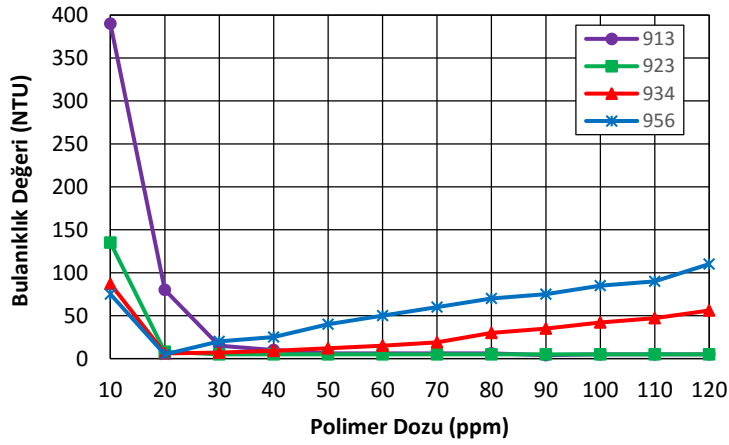
Katı-sıvı ayrımı için çok çeşitli polimerler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Atık zeminin özelliklerine göre etkili polimer tipi ve dozu araştırmacılar arasında en yaygın kabul görmüş deney yöntemi olan bulanıklık deneyleri ile belirlenmesine rağmen, bu deneylerde karıştırma hızı, karıştırma süresi ve bulamacın çökeltme süresi gibi sonuca etki eden bazı faktörlerde uygulama farklılıkları görülmektedir. Bulanıklık deneyleri için farklı araştırmacılar tarafından benimsenen karıştırma parametreleri Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4. Literatürde kullanılan parametreler

Araştırmacılar	Zemin Tipi	Seçilen karıştırma hızı (dev/dk)	Seçilen karıştırma süresi (dk)	Seçilen bekleme süresi (dk)
Zhu ve diğ. [12]	Yağ içerikli endüstriyel atıklar	100	2	5
Oruç ve Sabah [13]	Tunçbilek kömür tesisi atığı	150	0,5 - 0,75	15
Spritzer ve diğ. [14]	İnce taneli siltli kil	260 - 270	1	2
Fatema ve diğ. [15]	Uçucu kül	180 - 200	1	0,5
Sengul ve Bulut [5]	Seyitömer uçucu külü	200 - 250	1 - 3	2 - 4

Bulanıklık deneylerinde yapılan bu farklı uygulamalar zemin tipine ve çoğu zaman araştırmacının tecrübesine göre belirlenmesine rağmen belirlenen bu faktörler optimum seviyelerinden uzak olabilmektedir. Bu nedenle süspansiyonun optimum karıştırma hızı, karıştırma ve çökeltme süreleri, ortam sıcaklığı ve polimerlerin etkili kullanım sürelerinin katı sıvı ayrımında uygulanacak polimer tipi ve dozunun belirlenmesine etkisi her çalışma sahası için deneysel olarak belirlenmesi gerekmektedir.

Atık zemininin çöktürülmesinde etkili polimer tipi ve dozunun belirlenmesi için 4 farklı anyonik tipte polimer seçilip bulanıklık deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde karıştırma hızı, karıştırma süresi ve bulamacın çökeltme süresi sabit tutulup etkili polimer ve dozu belirlenmiştir. Farklı yük yoğunluklu ve dozlu polimer ilave edildiğinde elde edilen bulanıklık deney sonuçları Şekil 3'te gösterilmiştir.

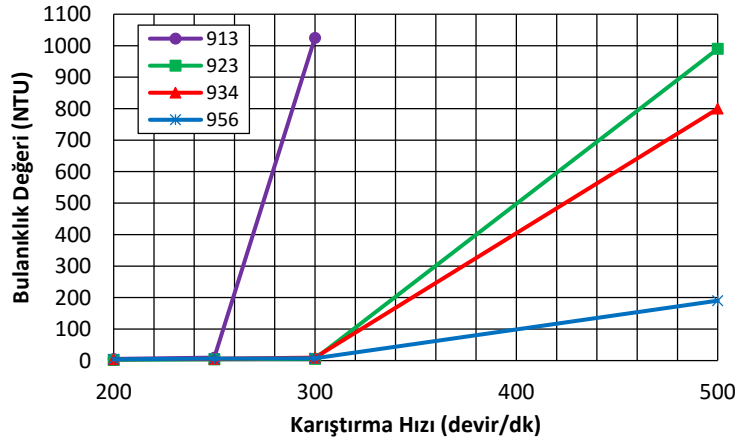


Şekil IV. Polimer katkılı atık zeminin bulanıklık deney sonuçları

Espey bor zenginleştirme tesisinin atık zemini ile yapılan bulanıklık deneylerinde 4 farklı anyonik polimer kullanılmış olup, bu polimerlerin tamamının atık zemin süspansiyonunda taneler arası fiziksel bir köprü kurarak onların topaklaşması sonucunda hızlı bir şekilde çökmesini sağladığı görülmüştür. 913 anyonik polimerinin değişen dozlarda kullanıldığı bulanıklık deneylerinde 20 NTU limit bulanıklık değeri altına 30 ppm dozda ulaşıldığı, daha sonra polimer dozunun artırılmasının süspansiyonun bulanıklık değerinde önemli bir değişikliğe neden olmadığı belirlenmiştir. Diğer anyonik polimerlerin kullanıldığı deneylerde limit bulanıklık değerine 20 ppm dozda ulaşılmasına rağmen, 956 ve 934 anyonik polimerinin kullanıldığı deneylerde artan polimer dozlarında sırasıyla 50 ppm ve 80 ppm'de süspansiyonun bulanıklık değerinin limit bulanıklık değerinin üzerine çıktığı belirlenmiştir. 923 anyonik polimerinin kullanıldığı deneylerde 20 ppm'den daha yüksek polimer dozlarında süspansiyonun bulanıklığında herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Bu nedenle Espey atık zemininde katı-sıvı ayrımı için ideal polimer dozunun 20 ppm olduğu, etkili polimer olarak 923, 934 ve 956 anyonik polimerlerinin üçünün de seçilebileceği, buna rağmen aşırı doz polimer kullanılması durumunda süspansiyonun bulanıklığında artışa neden olmayan 923 anyonik polimerinin seçilmesinin daha uygun olduğu düşünülmektedir.

B. Karıştırma Hızının Bulanıklığa Etkisi

Endüstriyel atıklarda etkili katı sıvı ayrımı için polimerin süspansiyondaki tanelerle yeterli teması sağlayacak şekilde karıştırılması gerekmektedir. Bu nedenle laboratuvar bulanıklık deneylerinde farklı karıştırma hızlarının süspansiyondaki tanelerin çökmesine dolayısı ile süspansiyonun bulanıklık değerine etkisinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu şekilde optimum temas süresi belirlenerek arazi uygulamalarında atık zeminin borularla taşınması sırasında polimerin porta dahil edileceği en uygun konumu, pompa hızı ve polimerin süspansiyonla temasını arttırmak için boruların bağlantı biçimleri tasarlanabilir. Bu amaçla polimerli atık zemin bulamacının karıştırma hızına bağlı olarak süspansiyonun bulanıklık değeri, karıştırma süresi üç dakika, çökme süresi iki dakika, polimer saklama süresi 24 saat ve süspansiyonun sıcaklığı 20 °C olarak kontrol altına alınıp, 200, 250, 300 ve 500 dev/dk karıştırma hızlarında tüm polimerler için belirlenmiştir. Karıştırma hızının bulanıklığa etkisi deney sonuçları Şekil 4'te gösterilmiştir.



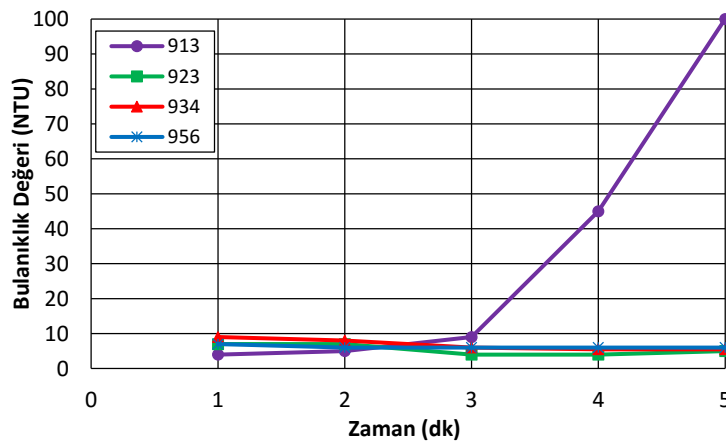
Şekil 4. Karıştırma hızının bulanıklığa etkisi

Bulanıklık deneylerinde 913 anyonik polimeri 250 dev/dk, diğer tüm polimerler 300 dev/dk'dan daha yüksek karıştırma hızlarında karıştırıldıklarında süspansiyonun bulanıklık değerinin çok hızlı bir şekilde arttığı belirlenmiştir. Yüksek karıştırma hızlarında türbülans nedeniyle polimerle süspansiyondaki taneler arası bağlar zarar görmekte, topaklaşmanın azalması nedeniyle çökme davranışı yavaşlamakta ve bu nedenle süspansiyonun bulanıklık değeri artmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre polimerin Espy atık zemini ile ideal karıştırma hızının 200-250 dev/dk aralığında olduğu belirlenmiştir.

C. Karıştırma Süresinin Bulanıklığa Etkisi

Atık zemin bulamacına eklenen polimerlerin süspansiyon içerisinde homojen olarak dağılması, temas ettiği taneler arası bağ oluşturarak topaklaşmanın sağlanabilmesi için ideal bir karıştırma süresince karıştırılması gerekmektedir. Karıştırma süresinin kısa olması polimerin süspansiyondaki tanelere temasını azaltırken, ideal karıştırma süresinin üzerine çıkılması durumunda topaklaşan tanelerin türbülans etkisiyle zarar görmesi sonucu daha küçük topaklara ayrılarak çökmesi gecikmektedir.

Atık zemin ile kullanılan polimerin ideal karıştırma süresinin belirlendiği deneylerde karıştırma hızı 250 rpm, çökme süresi iki dakika, polimer saklama süresi 24 saat ve karışım suyu sıcaklığı 20 °C olacak şekilde kontrol altında tutulmuş, polimerli atık zemin süspansiyonu 1, 2, 3, 4 ve 5 dakika değişen karıştırma sürelerinde karıştırıldıktan sonra süspansiyonun bulanıklık değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5'te sunulmuştur.



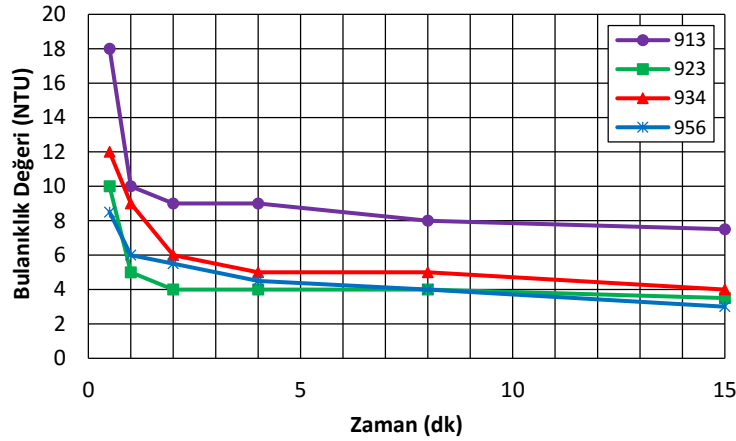
Şekil 5. Karıştırma süresinin bulanıklığa etkisi

Anyonik polimer katkılı atık zemin bulamacının karıştırma süresinin 1-3 dakika arasında değişmesi durumunda süspansiyonun bulanıklık değerinde önemli bir değişiklik olmazken üç dakikadan daha uzun

karıştırma sürelerinde anyonik 913 polimer katkılı süspansiyonda bulanıklık değeri karıştırma süresi arttıkça çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu sonuca göre, atık zeminin anyonik polimer kullanılarak çökeltilmesinde süspansiyonun ideal karıştırma süresinin 1-3 dakika aralığında olduğu belirlenmiştir.

D. Süspansiyonun Çökeltme Süresinin Bulanıklığa Etkisi

Süspansiyonun çökeltme süresinin bulanıklığa etkisinin belirlendiği deneylerde, karıştırma hızı 250 rpm, karıştırma süresi üç dakika, polimer saklama süresi 24 saat ve karışım suyu sıcaklığı 20 °C olacak şekilde kontrol altında tutulmuş, polimerli atık zemin süspansiyonu karıştırıldıktan sonra çökeltmesi için ½, 1, 2, 4, 8 ve 15 dk gibi farklı çökeltme süreleri uygulanmış ve süspansiyonun bulanıklık değerleri ölçülmüştür. Belirlenen bulanıklık değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir.

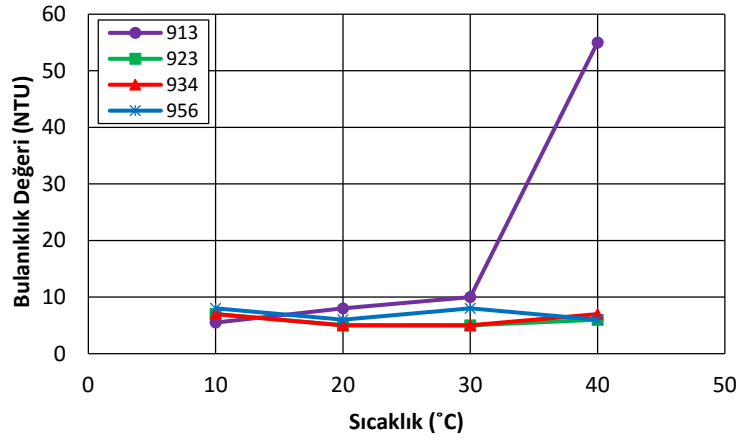


Şekil 6. Süspansiyonun çökeltme süresinin bulanıklığa etkisi

Elde edilen sonuçlara göre, 0-2 dk aralığında süspansiyonun çökeltme süresi arttıkça bulanıklık değeri hızlı bir şekilde azalırken, 4. dk'dan itibaren bulanıklık değerlerindeki azalma oldukça düşmektedir. Bunun nedeni olarak polimerin atık zemin süspansiyondaki taneleri topaklaştırarak çökeltilmesi mekanizmasında ilk dört dakikada çok etkili olduğu, bu süreden sonra tanelerin çökeltmesi devam etmesine rağmen bu çökeltmenin polimerin topaklaştırma etkisinden çok yerçekimi etkisiyle zamana bağlı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir. Atık zeminlerin polimer kullanılarak çökeltilmesinin araştırıldığı jar deneylerinde süspansiyonun çökeltme süresinin, polimerin tanelerin çökeltmesi üzerinde çok etkili olduğu 2 dk'dan daha kısa ve çökeltmesinin polimer etkisinden daha çok yerçekimi etkisiyle gerçekleştiği 4 dk'dan daha uzun seçilmemesi gerektiği anlaşılmaktadır. Bu sonuç, polimer katkılı süspansiyonun çökeltmesi için ideal sürenin 2-4 dk aralığında olduğunu göstermektedir.

E. Süspansiyon Sıcaklığının Katı-Sıvı Ayrımına Etkisi

Depolanan endüstriyel atıkların polimerler kullanılarak atık barajında çökeltilmesi ve bu şekilde katı danelerden ayrıştırılan suyun ortamdan uzaklaştırılması atık barajı hacminin efektif kullanılması yanında su basınçları etkisiyle stabilite problemlerinin de azaltılmasına sebep olmaktadır. Endüstriyel atıklar atık barajlarında mevsimsel farklılıklar nedeniyle farklı ortam sıcaklıklarında depolanmaktadır. Bu nedenle mevsimsel sıcaklık farklılıklarının, kullanılan polimerin flokülasyon mekanizmasına etkisinin belirlenmesi önem kazanmaktadır. Bu maksatla jar deneylerinde karıştırma hızı 250 rpm, karıştırma süresi üç dakika, çökeltme süresi iki dakika ve polimer saklama süresi 24 saat olarak sabit tutularak, ülkemizin iç ve dış sularında dört mevsim ölçülebilir sıcaklıklar olan 10, 20, 30 ve 40 °C gibi farklı süspansiyon sıcaklıklarında kullanılan polimerlerin flokülasyondaki verimliliğinin değişimi belirlenmiştir. Polimerlerin farklı ortam sıcaklıklarında kullanılmasının flokülasyon mekanizmasına etkisi Şekil 7.'de gösterilmiştir.

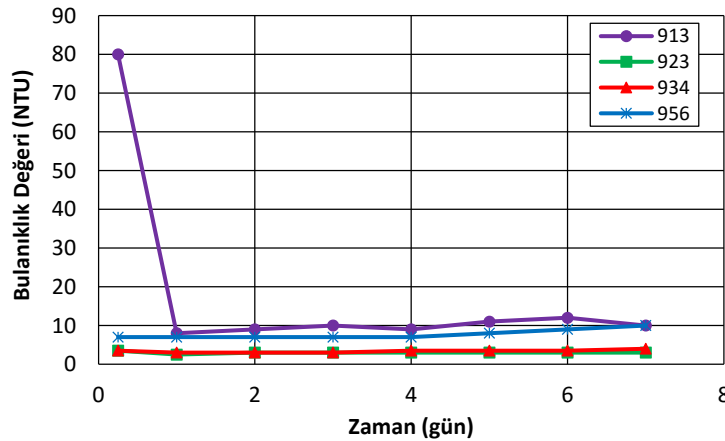


Şekil 7. Farklı ortam sıcaklıklarının flokülasyon mekanizmasına etkisi

913 anyonik polimerinin kullanıldığı deneylerde 30 °C'den düşük süspansiyon sıcaklıklarında sıcaklık artışına bağlı olarak bulanıklık değerinde hafif artış gözlemlenirken, 30 °C'den yüksek ortam sıcaklıklarında bulanıklık değerinde çok hızlı bir artış meydana gelmiştir. Bu sonuç 913 anyonik polimerinin farklı ortam sıcaklıklarında kullanılması durumunda sıcaklık artışına bağlı olarak atık zemini topaklaştırmadaki verimliliğinin azaldığı anlamına gelmektedir. 923, 934 ve 956 anyonik polimerlerinin kullanıldığı atık zemin süspansiyonlarında 10 - 40 °C gibi geniş bir ortam sıcaklığı aralığında süspansiyonun bulanıklığında önemli bir değişim gözlemlenmemiştir. Genel olarak katı sıvı ayırımında kullanılan farklı iyon yükü, yük yoğunluğu ve moleküler kütleye sahip polimerlerin farklı ortam sıcaklıklarında flokülasyondaki verimliliklerinin deneysel olarak belirlenmesi ile sıcaklığa bağlı olarak kullanılan polimer dozunda ayarlama yapılarak istenilen katı sıvı ayırımının başarılı bir şekilde sürdürülebilmesi sağlanabilir.

F. Polimer Çözeltisinin Saklama Süresinin Bulanıklığa Etkisi

Sentetik polimerler üreticiden kuru granüler toz formda temin edilirken, istenilen konsantrasyonda homojen sulu çözelti haline getirilerek katı sıvı ayırımında kullanılmaktadırlar. Sulu çözelti haline getirilen sentetik polimerlerin, çözeltide tüm polimerin homojen olarak çözülmesinin sağlanacağı minimum süre ve polimerin flokülasyonda verimliliğinin değişmediği maksimum süreler belirlenerek, saklanması ve kullanılması deneysel çalışmalarda elde edilen bulanıklık değerlerinin doğru yorumlanması açısından oldukça önemlidir. Bu maksatla kuru formdaki polimerler çözelti haline getirildikten sonra ¼, 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 gün gibi farklı saklama sürelerinde muhafaza edilip, atık zemin süspansiyonuna optimum dozda eklenerek, karıştırma hızı 250 rpm, karıştırma süresi üç dakika, çökeltme süresi iki dakika ve karışım suyu sıcaklığı 20 °C olarak sabit tutularak polimer saklama süresinin flokülasyona etkisi belirlenmiştir. Belirlenen bulanıklık değerleri Şekil 8.'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Polimer çözeltisinin saklama süresinin bulanıklığa etkisi

Deneysel sonuçları incelendiğinde polimerlerin çözelti haline getirildikten sonra bir haftalık saklama süreleri boyunca flokülasyonda herhangi bir verimlilik kaybı olmadan kullanılabilmesi anlaşılmaktadır. 913 anyonik polimerinin sulu çözelti haline getirilip altı saat bekletildikten sonra kullanılmasıyla elde edilen bulanıklık değerinin, diğer anyonik polimerlerin altı saat saklama süresinden sonra elde edilen bulanıklık değerlerinden çok yüksek olması ve 24 saat sonunda 7 gün süreyle bulanıklık değerlerinde önemli bir değişiklik göstermemesi polimerin sulu formda homojen çözülmesi için minimum 24 saat süreyle bekletilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Diğer polimerlerin ise çözelti haline getirildikten 6 saat sonra kullanılmasının bulanıklık değerleri üzerinde önemli bir değişime neden olmadığı belirlenmiştir.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, bor zenginleştirme tesisi atığının anyonik iyon yüklü polimerle çökeltilerek depolanmasının araştırıldığı bu çalışmada ideal karıştırma hızının 200-250 dev/dk, karıştırma süresinin 1-3 dk, çökeltme süresinin 2-4 dk olduğu belirlenmiştir. Ayrıca farklı ortam sıcaklıklarında (10-30 °C) ve polimer çözeltisi hazırlandıktan 24 saat sonra 7 gün boyunca polimerin etkinliğinde önemli bir azalma olmadan katı sıvı ayırımında kullanılabilmesi deneysel olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, Sengül ve Bulut [5] tarafından yürütülen F sınıfı uçucu külden oluşan atık zemin bulamacının anyonik ve katyonik polimerler ile çökeltilerek katı sıvı ayırımının yapıldığı çalışmada elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Bu nedenle, farklı atık zeminlerin polimer kullanılarak çökeltilmesi çalışmalarında polimer verimliliğine etki eden faktörlerin optimum değerleri belirlenmeden etkili polimer tipi ve dozunun belirlenmesi durumunda, bu çalışmalarda belirlenmiş olan optimum değerler referans kabul edilebilir.

V. SONUÇLAR

Bu deneysel çalışmada endüstriyel bir atık olan Kütahya Espey bor zenginleştirme (konsantratör) tesisi atığının katı – sıvı ayırımı yapılarak depolanmasında farklı yük yoğunluğuna sahip dört farklı sentetik polimerden etkili polimer tipi ve dozu jar testleri yapılarak belirlenmiştir. Kullanılan polimer tipi ve dozu katı-sıvı ayırımında sonuca etki eden en önemli faktör olmasına rağmen süspansiyonun ideal karıştırma hızı, karıştırma ve çökeltme süreleri, süspansiyon sıcaklığı, polimer saklama süreleri flokülasyon ve dolayısıyla süspansiyonun bulanıklık değeri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar özetlendiğinde;

- Kütlece katı tane oranı %15 olan, düşük plastisiteli kil zeminden oluşan endüstriyel atığın katı sıvı ayırımında anyonik iyon yüklü polimerlerin etkin bir şekilde kullanılabilmesi düşünülmektedir.
- Süspansiyondaki katı danelerin çökeltilmesinde orta ve yüksek yük yoğunluklu anyonik polimerlerin 20 ppm dozda daha etkili olduğu, bazı polimer tiplerinde ise artan polimer dozlarında bulanıklık değerinde bir miktar artış meydana geldiği dolayısıyla bu dozlarda kritik misel konsantrasyonunun aşıldığı anlaşılmıştır.
- Atık zemin süspansiyonundaki tanelerle polimerin etkili bir şekilde temas etmesi ve taneler arası fiziksel bir köprü kurarak topaklaşmasını sağlayıp hızlı bir şekilde çökmesi için ideal karıştırma hızının 200-250 dev/dk ve karıştırma süresinin 1-3 dakika aralığında olduğu belirlenmiştir. Daha yüksek karıştırma hızları ve sürelerinde topaklaşan taneler arası fiziksel köprülerin zarar görmesi nedeniyle süspansiyonun bulanıklık değeri ve çökeltme sürelerinde artış meydana gelmektedir.
- Polimer katılı süspansiyonun çökmesi için ideal sürenin 2-4 dk aralığında olduğunu, polimer etkisiyle meydana gelen topakların ilk 4 dk da çöklediği bu nedenle bulanıklık değerinde hızlı bir düşüş olduğu, bu süreden daha uzun bekleme sürelerinde bulanıklıktaki azalmanın polimer etkisinden çok süspansiyonda askıda kalmış tanelerin zamana bağlı çökmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Farklı ortam sıcaklıklarında sıcaklığın polimer performansı üzerine etkisi incelendiğinde 10 - 30 °C sıcaklık aralığında süspansiyonun bulanıklığında önemli bir değişim gözlemlenmediği, 30 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda flokülasyonun olumsuz etkilenebileceği ve bu nedenle kullanılan polimer dozu ayarlanarak bu olumsuz etkinin azaltılabileceği düşünülmektedir.
- Katı haldeki polimerlerin çözelti halinde hazırlandıktan 24 saat sonra bir haftalık süre boyunca deneysel araştırmalarda bulanıklık değerlerinde önemli bir değişikliğe neden olmayacak şekilde kullanılmaya uygun olduğu, arazi katı - sıvı ayırımı uygulamalarında bu süreden çok daha uzun bir süre flokülasyonda etkili bir şekilde kullanılabilmesi saptanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Adiansyah, J.S., Rosano, M., Vink, S., & Keir, G. (2015). A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies, *Journal of Cleaner Production*, 1081050–1062, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.139>.
- [2] World Information Service on Energy. (2019). WISE-Uranium Project, *Chronology of Major Tailings Dam Failures*. <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>. (Accessed 26 August 2022).
- [3] Maurer, B. W., Gustafson, A. C., Bhatia, S. K., & Palomino, A. M. (2012). Geotextile dewatering of flocculated, fiber reinforced fly-ash slurry. *Fuel*, 97, 411-417.
- [4] Cetin, D., Sengul, T., Bhatia, S. K., & Khachan, M. M. (2017). Effect of polymer and fiber usage on dewatering and compressibility behavior of fly ash slurries. *Marine Georesources & Geotechnology*, 35(5), 678-687.
- [5] Sengul, T., & Bulut, A. (2022). Determination of the factors affecting the efficiency of the polymer in solid-liquid separation with synthetic polymers. *Arab J Geosci* 15, 858 <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10108-3>
- [6] Satyamurthy, R. & Bhatia, S. K. (2009). Effect of polymer conditioning on dewatering characteristics of fine sediment slurry using geotextiles. *Geosynthetics International*, 16(2), 83-96. <https://doi.org/10.1680/gein.2009.16.2.83>
- [7] Sher, F., Malik, A., & Liu, H. (2013). Industrial polymer effluent treatment by chemical coagulation and flocculation, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(4), 684-689, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.07.003>.
- [8] Tassinari, B., Conaghan, S., Freeland, B., & Marison, I. W. (2015). Application of turbidity meters for the quantitative analysis of flocculation in a jar test apparatus. *Journal of Environmental Engineering*, 141(9), [https://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000940](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000940)
- [9] ASTM D 6913-04. (2009). Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis. *Annual Book of ASTM Standards*.
- [10] [ASTM D7928-17. (2017). Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis. *Annual Book of ASTM Standards*.
- [11] ASTM D2035-19. (2019). Standard practice for coagulation - flocculation jar test of water. West Conshohocken, PA, United States. ASTM International. <http://www.astm.org>.
- [12] Zhu, X., Reed, B. E., Lin, W., Carriere, P. E. & Roark, G. A. R. Y. (1997). Investigation of emulsified oil wastewater treatment with polymers. *Separation Science and Technology*, 32(13), 2173-2187.
- [13] Oruç, F. & Sabah, E. (2006). Effect of mixing conditions on flocculation performance of fine coal tailings. XXIII. International Mineral Processing Congress, 3-8 September 2006, Istanbul-Turkey.
- [14] Spritzer, J. M., Khachan, M. M. & Bhatia, S. K. (2015). Influence of synthetic and natural fibers on dewatering rate and shear strength of slurries in geotextile tube applications. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 1(3), 26.
- [15] Fatema, N., Bhatia, S. K. & Grady, W. F. (2018). Comparison of 1-D and 2-D geotextile dewatering tests with fly ash slurry. In Proceedings of the 11th International Conference on Geosynthetics, 16-21. September 2018, Seoul, Korea.