

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POMZADAN ALÜMİNA ÜRETİMİNİN HİDROMETALURJİK YÖNTEMLERLE
ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MUHAMMED KÜRŞAT AYDEMİR

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Murat ERDEMOĞLU

HAZİRAN-2021

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POMZADAN ALÜMİNA ÜRETİMİNİN HİDROMETALURJİK YÖNTEMLERLE
ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MUHAMMED KÜRŞAT AYDEMİR
(36183616015)

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Murat ERDEMOĞLU

HAZİRAN-2021

TEŞEKKÜR ve ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının başından bu yana akademik bilgi birikimlerini ve tecrübelerini bana aktararak ufkumu açan, gerek akademik olarak gerekse de insani olarak ilgi, alaka ve desteğini benden esirgemeyerek tez çalışmama en büyük katkıyı sağlayan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Murat ERDEMOĞLU'na,

FYL-2020-1984 no'lu “Pomzadan Alümina Üretiminin Hidrometalurjik Yöntemlerle Araştırılması” başlıklı projeyi destekleyerek maddi katkıda bulunan İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine,

Pomza örneği sağlayarak tez çalışmalarına büyük katkı sağlayan Sayın Mehmet AKBOĞA'ya (Mabimssan Malatya Bims San. Tic. Ltd. Şti., Malatya),

FAAS analizleri için her türlü laboratuvar imkanını sağlayan ve bilgi birikimlerini bana aktaran çok sevgili hocam Prof. Dr. Sema ERDEMOĞLU (Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü)'na,

Laboratuvar çalışmaları hakkındaki bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen Maden Yüksek Mühendisi Tufan KIYAK'a ve Maden Yüksek Mühendisi Ramazan AYDOĞMUŞ'a

FAAS analizleri konusundaki yardımlarından dolayı Dr. Hatice ÇAĞLAR YILMAZ'a ve Emine METE'ye

Çocukluğumdan bu yana yanımda olan, maddi ve manevi her konuda olduğu gibi tez çalışmam hususunda da beni her zaman destekleyen çocukluk arkadaşım, can dostum Alperen KODAZ'a,

Bütün hayatım boyunca her koşul ve şartta yanımda olan, maddi manevi her türlü desteği veren, bugün elde ettiğim ne kadar başarı varsa borçlu olduğum, her tökezlediğimde elimden tutup kaldıran çok kıymetli AİLEM'e

Bugün özgürce bilimsel faaliyetlerde bulunabildiğimiz Türkiye Cumhuriyeti'ni kurarak biz Türk gençlerinin yolunu açan, “Türk mühendislerinin alnında cumhuriyetin istikbalini aydınlatan ışık parıldar.” sözüyle bizleri onurlandıran, istiklalimizin mimarı, Türk Milleti'nin iftihar kaynağı ulu önder Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK'e,

teşekkürü bir borç bilirim.

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “**Pomzadan Alümina Üretiminin Hidrometalurjik Yöntemlerle Araştırılması**” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada tez yazım yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Muhammed Kürşat AYDEMİR



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR ve ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER ve KISALTMALAR.....	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1. Pomza.....	3
2.1.1. Pomzanın oluşumu	6
2.1.2. Pomzanın kullanım alanları	7
2.1.3. Dünya ve Türkiye’de pomza potansiyeli.....	11
2.2. Hidrometalurji.....	17
2.2.1. Liç işlemi	17
2.3. Mekanik Aktivasyon.....	30
2.3.1. Mekanik aktivasyon ekipmanları.....	33
2.3.2. Mekanik aktivasyonun minerallerin çözünmesine etkileri.....	35
2.3.3. Endüstride kullanılan mekanik aktivasyon prosesleri	36
2.3.4. Literatürde yapılan bazı çalışmalar.....	39
2.4. Alümina Özellikleri ve Kullanım Alanları	41
2.5. Alümina Türleri	42
2.5.1. Bayer hidratı, metalurjik ve feedstock alüminalar.....	42
2.5.2. Tabular alümina	43
2.5.3. Özel kalsine alüminalar	43
2.6. Alümina Üretimi	49
2.6.1. Bayer prosesi	49
2.7. Boksit Dışı Kaynaklardan Alümina Üretimi	51
2.8. Bozuşturma Kavurması.....	53
3. MALZEME ve YÖNTEM	55
3.1. Malzeme.....	55
3.2. Yöntem.....	57
3.2.1. Cevher hazırlama	58

3.2.2.	Mekanik aktivasyon için aşırı öğütme	59
3.2.3.	Su ve asit çözeltisinde liç	60
3.2.4.	$AlCl_3$ çöktürmesi için evaporasyon işlemi	63
3.2.5.	Alümina üretimi için $AlCl_3$ 'ün Bozuşturma Kavurması	64
3.2.6.	Analiz donanım ve yöntemleri	66
4.	BULGULAR ve TARTIŞMA	69
4.1.	Pomzanın Karakterizasyonu Çalışmaları	69
4.2.	Mekanik Aktivasyon için Aşırı Öğütme	80
4.3.	Pomzanın Su ve Asitte Liçi Çalışmaları	82
4.3.1.	Asit türü ve aşırı öğütme süresi etkisi	82
4.3.2.	Liç süresi etkisi	87
4.3.3.	Asit derişimi etkisi	88
4.3.4.	Liç sıcaklığı etkisi	90
4.4.	$AlCl_3$ Çöktürmesi için Evaporasyon İşlemi	92
4.5.	Pomza Alüminası Üretimi için Bozuşturma Kavurması	92
5.	SONUÇ ve ÖNERİLER	95
5.1.	Sonuçlar	95
5.2.	Öneriler	96
KAYNAKLAR		99
ÖZGEÇMİŞ		105

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1: Asidik ve bazik pomza kimyasal bileşimi.....	4
Çizelge 2.2: Dünya pomza rezervleri	12
Çizelge 2.3: Türkiye pomza rezervleri.	13
Çizelge 2.4: Yıllara göre Pomza üretimi ile pomza ihracatı karşılaştırması	16
Çizelge 2.5: Liç yöntemlerinin sınıflandırılması.....	18
Çizelge 2.6: Metal sülfürlerin ve kalkopirit mineralinin basınç liçi reaksiyon denklemleri.	26
Çizelge 2.7: Sülfürlü minerallerin doğrudan bakteriyel liç reaksiyonu	28
Çizelge 2.8: Sülfürlü minerallerin Fe^{3+} iyonları tarafından oksitlenme reaksiyonları.	29
Çizelge 2.9: Özel alüminaların kullanım alanları.....	45
Çizelge 2.10: Gibsit, Böhmite ve Diasporun çözünme reaksiyonları.	46
Çizelge 2.11: Kaolinitin farklı süreçlerdeki reaksiyonları.....	53
Çizelge 2.12: Bazı farklı alüminyum tuzlarının bozuşma tepkimeleri.	54
Çizelge 3.1: Aşırı öğütme programı.	60
Çizelge 3.2: Pomzanın asitte liçi işlemlerinde incelenen parametreler.	61
Çizelge 4.1: Tüvenan pomzanın kimyasal içeriği.	69
Çizelge 4.2: Kümülatif elek altı.....	72
Çizelge 4.3: Tüvenan ve aşırı öğütülmüş pomza örneklerinin d_{50} ve d_{90} değerleri.....	73
Çizelge 4.4: Tüvenan ve aşırı öğütülmüş pomza örneklerinin BET yüzey alanları.	73
Çizelge 4.5: Tüvenan pomzanın ön deneme liç koşulları.....	79
Çizelge 4.6: Asit türü ve aşırı öğütme süresi çalışmaları sonucu Al kazanım verimleri.....	82
Çizelge 4.7: Liç atıklarının kimyasal içeriği.	84
Çizelge 4.8: Liç süresi çalışmaları sonucunda elde edilen Al kazanımları.	87
Çizelge 4.9: Asit derişimi çalışmaları sonucunda elde edilen Al kazanımları.	89
Çizelge 4.10: Liç sıcaklığı çalışmaları sonucunda elde edilen Al kazanımları.	90
Çizelge 4.11: Asit liçi çalışmaları sonucunda en yüksek Al kazanımının elde edildiği liç koşulları.	91
Çizelge 4.12: Pomza alüminası kimyasal içeriği.....	92

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Yıllara göre dünya alümina üretimi.	1
Şekil 1.2: Dünya boksit rezervinin ülkelere dağılımı	2
Şekil 2.1: Pomzanın genel görünümü.	3
Şekil 2.2: Pomzanın XRD deseni	5
Şekil 2.3: Pomzanın XRD deseni.	5
Şekil 2.4: Pomzanın oluşum evreleri	6
Şekil 2.5: Pomza yataklarının dünyadaki dağılımı	11
Şekil 2.6: Türkiye'deki pomza yataklarının dağılımı	13
Şekil 2.7: Türkiye pomza rezervinin illere göre dağılımı.....	14
Şekil 2.8: Türkiye'nin yıllara göre pomza üretimi	14
Şekil 2.9: Türkiye'nin yıllara göre pomza ihracat miktarları ve değerleri.....	15
Şekil 2.10: Hidrometalurji aşamaları.	17
Şekil 2.11: Yerinde liç işlemi şematik görüntüsü.....	19
Şekil 2.12: Uranyum cevheri yerinde liç uygulaması.....	20
Şekil 2.13: Süzülme Liçi Düzeneği.	21
Şekil 2.14: Yığın liçi yöntemiyle altın üretimi genel akım şeması.....	23
Şekil 2.15: İnce ve iri tanelerin ayrışması	24
Şekil 2.16: Yığının tabakalar halinde serilmesi.....	24
Şekil 2.17: Sherrit-Gordon otoklavı	25
Şekil 2.18: Basınç liçi genel şematik akım şeması.....	27
Şekil 2.19: Bakterilerin mineral yüzeyine tutunması	28
Şekil 2.20: Dolaylı bakteriyel liç işlemi şematik görüntüsü.....	29
Şekil 2.21: Karıştırmalı tank prosesi	30
Şekil 2.22: Yaş öğütme için koloidal değirmen.	31
Şekil 2.23: İlk mekanokimyasal reaktör	31
Şekil 2.24: Aktifleştirilmiş katıların genelleştirilmiş gevşeme eğrisi	32
Şekil 2.25: Değirmenlerde oluşan temel gerilim türleri	33
Şekil 2.26: Mekanik aktivasyon amacı ile kullanılan değirmenler	34
Şekil 2.27: Minerallerin teras, basamak ve köşe bölgeleri.	35
Şekil 2.28: Proses akım şeması.....	36
Şekil 2.29: Activox prosesi şematik görünümü.....	37
Şekil 2.30: Lurgi-Mitterberg prosesi akım şeması	38
Şekil 2.31: Başlıca alümina ürünleri.....	44
Şekil 2.32: Aktif alümina türleri.....	48
Şekil 2.33: Bayer prosesi akım şeması.	50
Şekil 2.34: Boksitin alkali liçi	50
Şekil 2.35: Kil minerallerinden alümina üretimi akım şeması	52
Şekil 3.1: Kayseri-Talas, Kamber Köyü yer bulduru haritası.	56
Şekil 3.2: Pomzadan alümina üretimi çalışmaları genel akım şeması.....	57
Şekil 3.3: Pomzanın hazırlanma akım şeması.	58
Şekil 3.4: Gezegensel değirmen, öğütme havanı ve bilyaları	59
Şekil 3.5: Balon ısıtıcılı liç düzeneği.....	62
Şekil 3.6: Pomzanın asitte liçinde sıcaklık etkisini inceleme çalışmaları için kullanılan düzeneği.....	63

Şekil 3.7: Evaporasyon düzeneği.....	64
Şekil 3.8: Tüp fırın ve bozuşturma kavurması düzeneği.	65
Şekil 3.9: Tane boyut dağılımı analiz cihazı.	67
Şekil 3.10: FAAS cihazı görünümü.....	68
Şekil 4.1: Tüvenan pomza XRD deseni.....	70
Şekil 4.2: Tüvenan pomza SEM görüntüleri	71
Şekil 4.3: Tüvenan ve aşırı öğütülmüş pomza örneklerinin tane boyu dağılım eğrisi.	72
Şekil 4.4: 15 dk aşırı öğütülmüş pomza SEM görüntüsü	75
Şekil 4.5: 30 dk aşırı öğütülmüş pomza SEM görüntüsü	76
Şekil 4.6: 60 dk aşırı öğütülmüş pomza SEM görüntüsü.	77
Şekil 4.7: Ferromanyetik özellik gösteren malzeme XRD deseni.....	78
Şekil 4.8: Psödobrokit ve tüvenan pomza karşılaştırmalı XRD deseni.....	79
Şekil 4.9: Tüvenan ve aşırı öğütülmüş pomza örneklerinin karşılaştırmalı XRD deseni....	80
Şekil 4.10: Tüvenan ve 60 dk aşırı öğütülmüş pomzanın karşılaştırmalı XRD deseni.	81
Şekil 4.11: Al kazanımının aşırı öğütme süresi ve asit türüne bağlı değişimi.	83
Şekil 4.12: Liç atığındaki Al_2O_3 içeriğinin asit türü ve aşırı öğütme süresine bağlı değişimi.	85
Şekil 4.13: HCl liç atıklarının karşılaştırmalı XRD desenleri.....	85
Şekil 4.14: HNO_3 liç atıklarının karşılaştırmalı XRD desenleri.....	86
Şekil 4.15: H_2SO_4 liç atıklarının karşılaştırmalı XRD desenleri.....	87
Şekil 4.16: Al kazanımının liç süresine bağlı değişimi.	88
Şekil 4.17: Al kazanımının asit derişimine bağlı değişimi.	89
Şekil 4.18: Al kazanımının liç sıcaklığına bağlı değişimi	91
Şekil 4.19: Pomza alüminası XRD deseni.....	93
Şekil 4.20: Bozuşturma kavurması sonucu elde edilen pomza alüminası.....	93
Şekil 4.21: Fırın tozları XRD deseni (H: Halit (NaCl), S: Silvit (KCl))	94
Şekil 4.22. Fırın çeperinde toplanan Halit ve Silvit mineralleri.	94
Şekil 5.1: Pomzadan alümina üretimi için önerilen akım şeması.....	98

SEMBOLLER ve KISALTMALAR

B:C	:Ağırlıkça bilya (B), cevher (C) oranı
BET	:Yüzey alanı ölçüm yöntemi
d₅₀	:Ölçümü yapılan numunenin %50'sinin sahip olduğu tane boyu
d₉₀	:Ölçümü yapılan numunenin %90'ının sahip olduğu tane boyu
SEM	:Taramalı elektron mikroskobu
XRD	:X-ışını difraktometrisi
ICP-ES	:Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometer
A.Ö.	:Aşırı öğütme
µm	:Mikrometre

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

POMZADAN ALÜMİNA ÜRETİMİNİN HİDROMETALURJİK YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI

Muhammed Kürşat AYDEMİR

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

105 + x sayfa

2021

Danışman: Prof. Dr. Murat ERDEMOĞLU

Bu tez çalışmasında, Kayseri bölgesinden temin edilen başlıca %64,64 SiO₂ ve %14,85 Al₂O₃ içeriğine sahip asidik pomzanın hidrometalurjik yöntemlerle değerlendirilerek alümina üretimi olanakları incelenmiştir. Bu amaçla pomza su, HCl, H₂SO₄ ve HNO₃ çözeltilerinde liç edilerek bu ortamlardaki alüminyum kazanımları ortaya çıkarılmıştır.

Tüvenan pomzanın tüm ortamlardaki liçi sonucunda çözeltiliye anlamlı miktarda alüminyum alınamamış olması nedeniyle pomza mekanik olarak aktifleştirmek amacıyla gezegensel hareketli bilyalı değirmen kullanılarak 2-60 dk aralığında çeşitli sürelerde öğütülmüştür. Öğütülmüş ürünler, sabit koşullarda liç edilmiş ve en yüksek alüminyum kazanımı (%66,40) 60 dk. aşırı öğütülmüş pomzanın HCl çözeltisiyle liçi sonucunda elde edilmiştir. Alüminyum kazanımını artırmak üzere sıcaklık, süre ve asit derişimi parametrelerinin etkisinin araştırıldığı çalışmalar sonucunda 4 M HCl çözeltisinde, çözelti kaynama sıcaklığında ve 24 saatte yapılan liç işlemiyle alüminyum kazanımı %91,37'ye yükselmiştir. Elde edilen bu liç çözeltisinden evaporasyon yoluyla çöktürülen AlCl₃ tuzu 1200°C'de 3 saat kavrularak ilk kez pomza alüminası üretilmiştir. Alüminanın %62,87 Al₂O₃ içeriğine sahip olduğu, sodyum ve potasyum içeriğinin çok düşük ancak demir ve kalsiyum içeriğinin ise yüksek olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, pomzadan alümina üretimi için mekanik aktivasyon, asit liçi, çözelti saflaştırma, çöktürme ve kavurma aşamalarından oluşan temel bir akım şeması önerilmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Pomza, alümina üretimi, asit liçi, mekanik aktivasyon

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF ALUMINA PRODUCTION FROM PUMICE BY HYDROMETALLURGICAL METHODS

Muhammed Kürşat AYDEMİR

İnönü University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mining Engineering

105 + x pages

2021

Supervisor: Prof. Dr. Murat ERDEMOĞLU

In this thesis study, the possibilities of alumina production from pumice were investigated by evaluating the acidic pumice with 64.64% SiO_2 and 14.85% Al_2O_3 content, obtained from Kayseri region by hydrometallurgical methods. For this purpose, pumice was leached in water, HCl, H_2SO_4 and HNO_3 solutions and the aluminium recoveries in these media were revealed.

As a result of the leaching of the run-of-mine pumice in all media, a significant amount of aluminium could not be taken into the solution, so it was milled at various times between 2-60 minutes using a planetary ball mill in order to mechanically activate the pumice. The milled products were leached under constant conditions and the highest aluminium recovery (66.40%) was obtained as a result of leaching the 60 min intensively milled pumice with HCl solution. As a result of studies investigating the effect of temperature, time and acid concentration parameters to increase aluminium recovery, it was increased to 91.37% by leaching in 4 M HCl solution at the boiling temperature for 24 hours. AlCl_3 salt precipitated from this leach solution through evaporation was roasted at 1200 °C for 3 hours and pumice alumina was produced for the first time. It was observed that alumina has 62.87% Al_2O_3 content, while sodium and potassium contents were very low, iron and calcium contents were high.

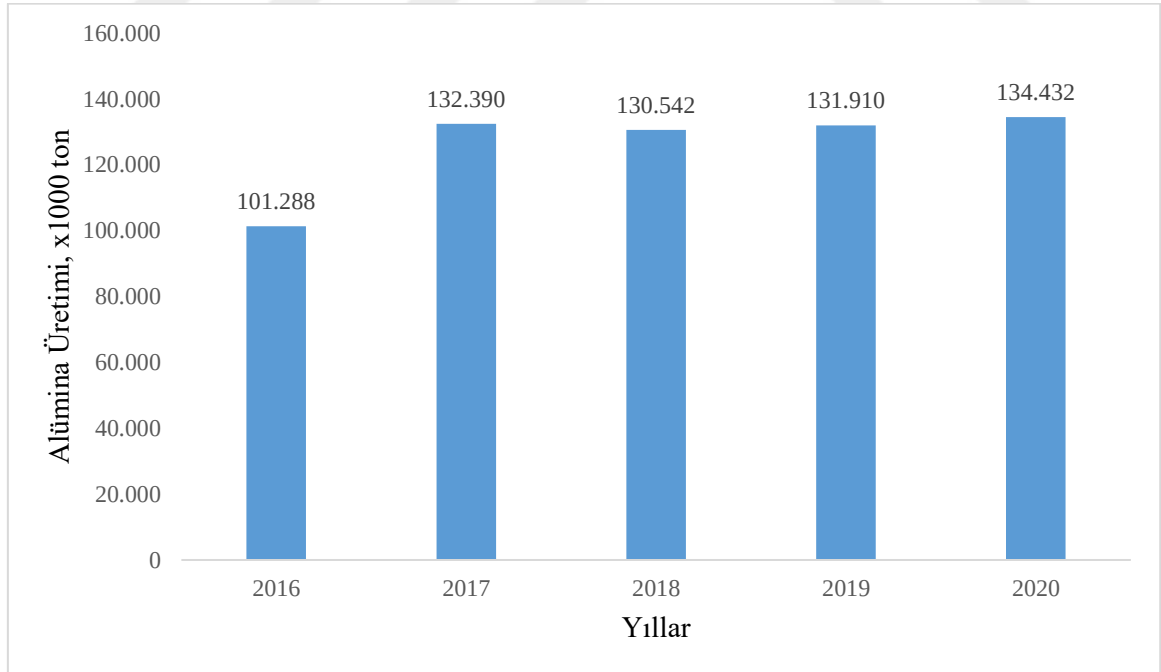
As a result, a basic flow sheet including mechanical activation, acid leaching, solution purification, precipitation and roasting stages was proposed for alumina production from pumice.

KEYWORDS: Pumice, alumina production, acid leaching, mechanical activation

1. GİRİŞ

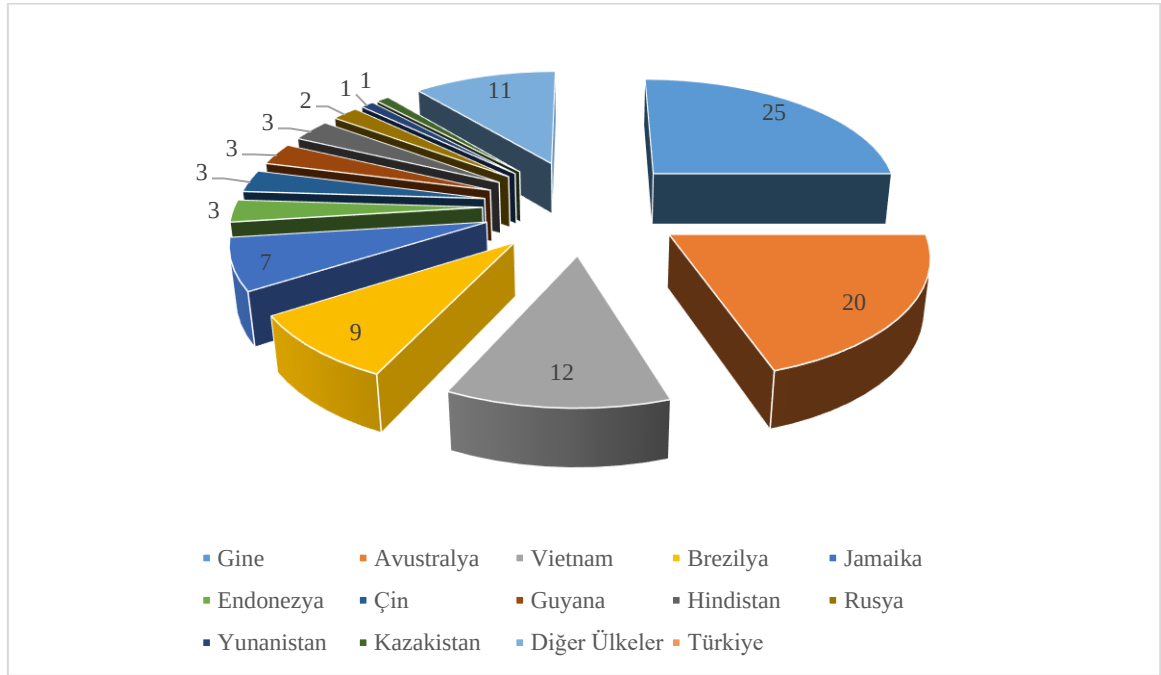
Yeraltı zenginliklerimizin hızlı biçimde tükenmesi, ekonomik olarak değerlendirilememesi, artan maliyetler ve değişen ihtiyaçlar neticesinde alternatif kaynaklara yönelim artış göstermiştir. Bununla birlikte var olan kaynaklarımızın da daha efektif ve katma değer sağlayacak şekilde değerlendirilme gerekliliği meydana gelmiştir. Bu kapsamda, bu tez çalışmasında bir magmatik kayaç olan pomzanın hidrometalurjik olarak değerlendirilme olanakları araştırılmış ve metal üretiminde kullanılabilirliği irdelenip özellikle alümina (Al_2O_3) üretimi üzerinde durulmuştur.

Alümina, hali hazırda boksit cevherinden üretilmektedir. Tüm dünyada hızla azalan boksit rezervlerine karşın artan alümina üretimi kısa zaman içerisinde boksit rezervlerinin tükenme noktasına geleceğini göstermektedir. 2016 yılında Dünya boksit rezervi 27,8 milyar ton iken 2020 yılı sonunda bu rakam yaklaşık %5,5 azalışla 26,3 milyar ton seviyelerine gerilemiştir (Anonim, 2021a). Buna karşın alümina üretimi 2016 yılında 101,3 milyon ton iken 2020 yılı sonunda 134,5 milyon tona yükselmiştir (Şekil 1.1.) (Anonim, 2021b).



Şekil 1.1: Yıllara göre dünya alümina üretimi. (Anonim, 2021b)

Şekil 1.1 incelendiğinde 2017 yılından itibaren yılda ortalama 130 milyon ton alümina üretildiği görülmektedir. 1 ton alümina üretimi için yaklaşık 2,5 ton boksit üretilmesi gerekmektedir. Bu durumda kalan boksit rezervinden yaklaşık 10 milyar ton daha alümina üretilbilecek durumdadır. Alümina üretiminin ortalama değerden sapmadan devam etmesi halinde tüm dünyada yaklaşık 80 yıllık rezerv kaldığı anlaşılmaktadır. Ancak kalan bu rezervin dünyaya eşit dağılmadığı, gelişmiş ülkelerde (Çin, Kanada vb.) ve Türkiye’de oldukça az olduğu görülmektedir. (Şekil 1.2.) (Anonim, 2021a)



Şekil 1.2: Dünya boksit rezervinin ülkelere dağılımı. % (Anonim, 2021a)

Boksit rezervinin ülkelere dağılımına bakıldığında dünya boksit rezervinin %50’den fazlasının Gine, Avustralya ve Vietnam’da olduğu görülmektedir. Bununla birlikte alümina üretiminde dünyada ilk üç sırada yer alan Çin, Rusya ve Kanada’nın boksit rezervlerinin toplamda yalnızca dünyanın %4’üne tekabül etmesi (Anonim, 2021a), boksit dışı kaynaklardan alümina üretimini gündeme getirmiştir. Özellikle ülkemizin pomza rezervinin yüksek olması ve pomzanın düşük üretim maliyetli bir kaynak olması alümina üretiminde değerlendirilebilmesi olanaklarının araştırılmasının önünü açmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Pomza

Pomza, boşluklu, süngerimsi, volkanik olaylar neticesinde oluşmuş, fiziksel ve kimyasal etkenlere karşı dayanıklı, gözenekli camsı volkanik bir kayadır. Oluşumu sırasında bünyedeki gazların ani olarak bünyeyi terk etmesi ve ani soğuması nedeniyle, makro ölçekten mikro ölçeğe kadar sayısız gözenek içerir. Gözenekler arası genelde bağlantısız boşluklu olduğundan, permeabilitesi düşük, ısı ve ses yalıtımı oldukça yüksektir. Sertliği Mohs sertlik cetveline göre 5-6'dır. Pomza kendisine özgü bazı özellikleri ile benzer volkanik camsı kayalardan (perlit, obsidyen, peş-tayn) ayrılır. Bunlardan rengi, gözenekliliği ve kristal suyunun olmaması ile pratik olarak ayrılmaktadır (Anonim, 2021c).

Pomza taneleri köseli ve yuvarlak olabilir. Tane büyüklükleri homojen değildir, farklılıklar göstermektedir. Özgül ağırlık, taneler büyüdükçe azalmaktadır. Tane boyutları arttıkça gözenek oranı da artış göstermektedir (Davraz ve Gündüz, 1997). Örneğin, aynı yatakta 0-2 mm'lik tane büyüklüğünde özgül ağırlık 0,75 kg/dm³, 4-8 mm'lik grupta 0,65 kg/dm³ ve 8-16mm'lik grupta 0,45 kg/dm³'dür (Karabay, 2006).

Pomzanın basınç dayanımı; kalkerin %5-10'u, elastisite modülü ise %2'si kadardır. 24 saatlik su emme yüzdeleri, ince agregada %20, iri agregada %30 civarındadır (Ünal ve diğ, 2003).



Şekil 2.1: Pomzanın genel görünümü.

Pomza, asidik ve bazik olmak üzere doğada iki türde bulunur. Bazik pomza kahverengi ve siyah olabilmektedir. Özgül ağırlığı 1-2 g/cm³ civarındadır. Asidik pomza ise kirli beyaz ve grimsi beyaz renkte olabilmektedir. Asidik pomzalarda silis oranı daha yüksek olup, inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazik pomzalar da ise alüminyum, demir, kalsiyum ve magnezyum bileşenleri daha yüksek oranda bulunması nedeniyle diğer endüstriyel alanlarda (örneğin gübre sanayiinde kek maddesi olarak, toprak ıslahı amacıyla tarımda vs.) kullanım alanı bulabilmektedir (Anonim, 2021c).

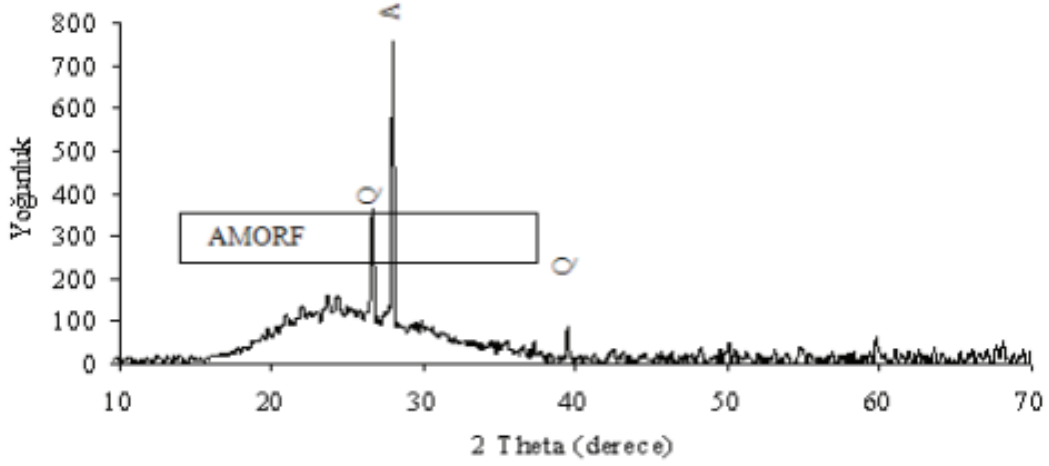
Pomzanın inşaat sektöründe kullanımı dünyada % 70 civarında iken ülkemizde ise bu oran % 80'i aşmış durumdadır. Pomzanın sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özellikler inşaat sektöründe kullanılmasını sağlayan en önemli etkenlerdendir. Bu özellikleri sayesinde ısı, ses ve hafiflik açısından yapı malzemelerinde kullanımı verimli olmuştur. Son yıllarda özellikle depremselliğin artış göstermesi pomza gibi dayanıklı, hafif, ses ve ısı geçirgenliği az olan malzemelerin inşaat sektöründe kullanımını günden güne arttırmıştır (Orhan ve diğ, 2017).

Pomzanın kullanım alanlarını etkileyen en önemli etken ise kimyasal içeriğidir. Asidik ve bazik pomza da kimyasal içerik farkı mevcuttur. Asidik pomza, bazik pomzaya oranla daha yüksek silis oranına sahiptir. Diğer yandan bazik pomza ise metal içeriği yönüyle asidik pomzadan önde gelmektedir. Asidik ve bazik pomzanın kimyasal bileşimi aşağıda gösterilmiştir (Çizelge 1) (Kılınç Aksay ve diğ, 2016; Yanık, 2007).

Çizelge 2.1: Asidik ve bazik pomza kimyasal bileşimi. (Kılınç Aksay ve diğ, 2016)

Bileşim	Asidik Pomza	Bazik Pomza
SiO ₂	70	45
Al ₂ O ₃	14	21
Fe ₂ O ₃	2,5	7
CaO	0,9	11
MgO	0,6	7
Na ₂ O + K ₂ O	9	8

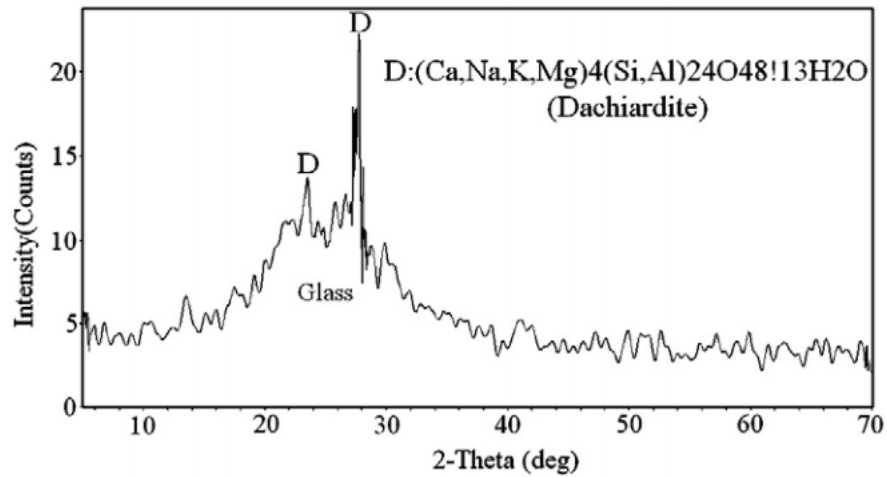
Ayrıca pomzanın literatürdeki XRD desenleri incelendiğinde çoğunlukla amorf bir yapı sergilediği ancak yer yer içerisinde bazı kristal minerallere ait pikler bulunduğu görülmüştür. Şekil 2.2’de bir pomza XRD deseni görülmektedir (Yıldız ve diğ, 2010).



Şekil 2.2: Pomzanın XRD deseni (Yıldız ve diğ, 2010)

Şekil incelendiğinde pomzanın Q: Kuvars [SiO_2], A: Albit [$(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$] lerden oluştuğu görülmüştür. 17-38° bölgesinde SiO_2 ’den ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) oluşan amorf yapı gözlenmektedir (Yıldız ve diğ, 2010).

Ayrıca bir başka literatür çalışmasında elde edilen pomza XRD deseni de Şekil 2.3’de görülmektedir (Ersoy ve diğ, 2010).

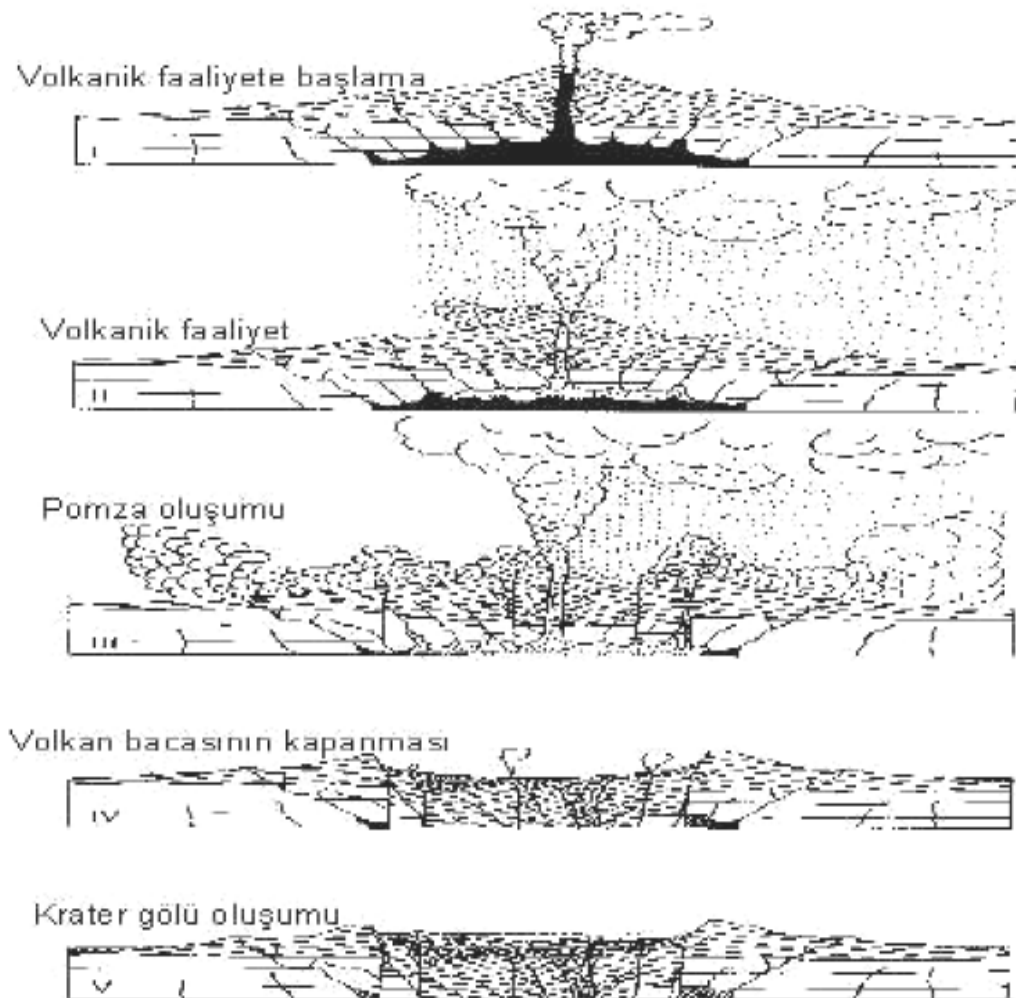


Şekil 2.3: Pomzanın XRD deseni. (Ersoy ve diğ, 2010)

2.1.1. Pomzanın oluşumu

Pomza volkanizma sonucu oluşmuş bir kayadır. Asidik magma, bazik magmaya oranla daha viskozdur ve silis içeriği yüksektir. Bazik magmanın sıvı durumda olduğu sıcaklıklarda asidik magma katı durumda bulunur. Basınç artışı nedeniyle asidik malzemeyle birlikte magmadaki erimiş gazlar da büyük patlamalarla bacadan püskürmeye başlar. Ani basınç sertleşmesi ani genleşmeleri oluşturur. Bu esnada bünyedeki uçucu bileşenlerin ani olarak kaçmasına neden olur (Yüksel, 2018).

Uçucuların ardından erimiş küresel parçalar atmosferle temas ettikleri anda hızla soğurlar. Bunun sonucunda pomza oluşur. Pomza oluşumuna etki eden faktörler; püskürme süresi, ara süreler, magmanın ısısı, magmadaki erimiş gaz miktarı ve püsküren malzemenin soğuma zamanıdır. Pomzanın oluşum evreleri Şekil 2.4'te görülmektedir (Yüksel, 2018).



Şekil 2.4: Pomzanın oluşum evreleri. (Yüksel, 2018).

2.1.2. Pomzanın kullanım alanları

Pomza, eski zamanlardan beri maddelerin temizlenmesinde ve parlatılmasında aşındırıcı olarak kullanılmaktadır. 1945 yılından sonra demiryolu mıcırı, inşaat malzemesi, yalıtım malzemesi, vb. olarak kullanılması gün geçtikçe teknolojinin gelişmesi ile değişik sanayi dallarında kullanımı artmıştır (Umucu, 2004). Pomzanın olası kullanım alanlarının yanı sıra geleneksel kullanım alanlarının tespiti için birçok çalışma yapılmıştır. Bu kapsamda birçok araştırmacı, organik (yani fenol, tekstil boyaları) ve inorganik (çeşitli ağır metaller ve radyoaktif elementler) su kirleticileri için adsorban olarak doğal ve/veya modifiye pomzanın kullanımını araştırmıştır (Ersoy ve diğ, 2010). Pomzanın doğrudan kullanıldığı sektörler şunlardır;

- Tekstil sektöründe,
- İnşaat sektöründe,
- Tarım sektöründe,
- Kimya sektöründe,
- Diğer endüstriyel ve teknolojik alanlarda kullanılmaktadır (Umucu, 2004).

2.1.2.1. Tekstil sektöründe kullanımı

Pomzanın kullanıldığı en önemli sektörlerden biri de tekstil sektörüdür. Pomza kot gibi giyeceklerin ağartılması ve yumuşatılması işlemlerinde kullanılır. Kumaşın yumuşatılması işlemine “taş yıkama” adı verilir. Hem yumuşatma hem de ağartma işlemi yapılıyorsa bu işleme de “kar yıkama” adı verilir. Bu iki işlem dışında sadece istenilen bölgeyi ağartmak amacıyla yapılan “kumlama” işlemi de mevcuttur (Umucu, 2004).

Bu sektörde kullanılacak pomzanın “tekstil kalitesi” özelliklerine sahip olması gerekmektedir. Bu özellikler şunlardır (Umucu, 2004)

- Pomza orta sertlikte olmalı ve kırılmadan ezilmelidir.
- Yapısında kumaşı çizebilecek pomzadan daha sert mineraller bulunmamalıdır.
- Kuru, yüksek poroziteli ve yuvarlatılmış olmalıdır.
- Kullanılan pomzanın kalitesi standart olmalıdır.
- Genellikle 3*4*5 cm ebadında olmalıdır.

- Beyaz renkte ve suda belirli süre yüzme kabiliyetine sahip olmalıdır.
- Su emme miktarı, istenilen limitlerde olmalıdır.

2.1.2.2. İnşaat sektöründe kullanımı

Ülkemizde üretilen pomzanın büyük bir kısmı inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Pomzanın inşaat sektöründe kullanımı dünyada % 70 civarında iken ülkemizde ise bu oran % 80'i aşmış durumdadır (Orhan ve diğ., 2017). İnşaat sektöründe pomza, hafif beton üretiminde agrega olarak kullanılmaktadır. Pomza normal kum ve çakıldan 3 kat daha hafiftir. Bu durum pomza kullanılarak üretilen hafif betonlarda da geçerlidir. Pomzadan yapılan beton, normal betondan çok daha hafif olduğundan taşınması ve kullanılması daha rahattır. Dolayısıyla zaman ve işçilikten de tasarruf sağlamaktadır. Zemin mekaniği açısından da temele inen yük azalacağından yaklaşık % 17 oranında inşaat demirinden tasarruf sağlanabilmektedir (Umucu, 2004).

Ayrıca pomza yüksek gözenekliliğe sahiptir ve bunun sonucu olarak agrega formunda düşük görünür yoğunluğa ($0,35-0,65 \text{ g/cm}^3$) sahiptir. Bu nedenle inşaat sektöründe, özellikle ısı/ses yalıtım özelliklerine sahip hafif tuğla ve beton elemanların üretiminde de kullanılmaktadır (Ersoy ve diğ., 2010).

Hafif agregalarla hafif beton üretilmesindeki en büyük sorunlardan biri, agregaların farklı elek gruplarında farklı ve yüksek su emme oranlarına sahip olmalarıdır. Doğal neme sahip agregalarla yapılan karışımlarda, pomza agregasının ilk 10 dakikalık su emme miktarı ile ilave su eklenen numuneler karşılaştırılmıştır. Buna göre pomza agregasının 1 günlük su emme miktarı kadar ilave su eklenen numunelerin basınç dayanımlarından %21, ultrases geçiş hızlarından %4, beton test çekici değerlerinden %16, yarmada çekme dayanımlarından %21 fazla olduğu ve yüzeysel aşınma kaybı da % 3 daha az olduğu gözlenmiştir (Gökçe ve Can, 2009).

Hafif beton üretiminde çimento ikame malzemesi ve iri agrega olarak volkanik pomzanın (VP) kullanılmasının uygunluğuna ilişkin araştırma sonuçları rapor edilmektedir. Testler, çimento ağırlıkça % 0 ila % 25 oranında değiştirilerek, beton üzerinde ise hacimce % 0 ile 100 iri agrega değiştirilerek yapılmıştır. VP'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri, çimento ve betonun hem taze hem de sertleşmiş hali üzerindeki olası etkisini değerlendirmek için kritik olarak gözden geçirilmiştir. Farklı Portland çimentosu-volkanik pomza tozu (VPP)

karışımları üzerindeki standart testler olumlu sonuçlar vermiş ve % 15'e kadar VPP kullanarak daha yüksek donma süresine sahip Portland volkanik pomza çimentosu (PVPC) üretme potansiyeli olduğunu göstermiştir. Farklı volkanik pomza agregası (VPA) yüzdeleri kullanan volkanik pomza betonunun (VPC) özellikleri, işlenebilirlik, mukavemet, kuruma büzülmesi, yüzey emilimi ve su geçirgenliği üzerine kapsamlı testler dizisi yapılarak değerlendirilmiştir. VPC'nin yapısal hafif beton olarak kabul edilmek için yeterli dayanıma ve yeterli yoğunluğa sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, kontrol betonu ile karşılaştırıldığında, VPC daha düşük elastisite modülüne sahip olduğu ve daha fazla geçirgenliğe ve ilk yüzey emilimine sahip olduğu görülmüştür (Hossain, 2004).

Pomzanın inşaat sektöründe yoğun olarak kullanılmasının başlıca nedenleri, pomzanın kolay işlenebilir, yangına karşı dirençli, ses yalıtımı, ısı yalıtımı ve termal dengeleyici özelliklerine sahip olmasıdır (Dinçer ve diğ, 2015).

2.1.2.3.Kimya sektöründe kullanımı

Bu sektörde pomza özellikle tarım ilaçlarında ve diş macunlarında kullanılmaktadır. Ayırık otlarıyla mücadele ilaçlarında, mantar ilaçlarında katalizör taşıyıcısı olarak suni gübrenin topraklaşmasını önleme amacıyla anti kek maddesi olarak kullanılmaktadır. Burada kimyasallar eşit taşıyıcı ve dengeleme rolü üstlenmektedir (Umucu, 2004).

Ayrıca pomza, özel boyalarda dolgu maddesi olarak kullanılır. Pürüzlü kaplamada ses izole edici duvar boyası olarak, motifli boya için astar macununu düzeltme işlerinde kullanılmaktadır. Boya tipinde kullanılacak pomzanın;

- A tipi (Trafik amaçlı boyalar için),
- B tipi (Kaymaz yüzey boyalar için olmak üzere iki ait başlık halinde tane boyu dağılımı ve diğer bazı özelliklerine bakılmaktadır (Umucu, 2004).

Ayrıca pomza, kozmetik sektöründe kişisel bakım malzemesi olarak ayak bakımında (topuk taşı) ve cilt bakım kremlerinde kullanılmaktadır. Son yıllarda Avrupa ülkelerinde kullanımı yaygınlaşan parfüm taşları pomzaya yeni bir kullanım alanı yaratmaktadır. Kokuyu uzun süre bünyesinde muhafaza edebilen parfüm emdirilmiş ve renklendirilmiş pomza taşları, çanta ve cep içlerinde, oto küllüklerinde kullanılmaktadır (Kılınç Aksay, 2005) . Pomza absorban malzeme olarak da bir çok sektörde kullanılmaktadır. Temizlik ve

deterjan endüstrisinde de kullanım alanı bulmaktadır (Aksoy, 2010). Pürüzlü kaplamada ses izole edici duvar boyası olarak ve motifli boya için astar macunu düzeltme işlemlerinde de kullanılmaktadır (Varol, 2016).

2.1.2.4.Tarım sektöründe kullanımı

Pomza gelişmiş ülkelerde genellikle tarımda kuraklığı engellemek amacıyla kullanılmaktadır. Bünyesindeki suyu uzun süre muhafaza ettiğinden dolayı nemli bir alan oluşturarak kuraklığa kısmi bir çare olarak görülmüştür. Su kaynakları yetersiz olan ülkeler, iklimin sıcak olmasından dolayı su kaybının önüne geçilebilmesi için toprağın altında belirli bir derinlikte ve belirli bir kalınlıkta serilen pomza tabakası içerisine (yastıklama), toprak altından su vererek, bitkilerin ihtiyacı olan suyun direkt olarak köklere ulaşması sağlanmakta ve buharlaşmadan kaynaklanan su kaybının önüne geçilmektedir (Tuncer ve Özkan, 2001).

Pomza, doğal halde bir hidrokültür hammaddesi olduğundan maliyet açısından geliştirilmiş perlit ve kile kıyasla çok daha düşük maliyetlidir. Son yıllarda bu konuda bazı Avrupa ülkeleri bu tip araştırmaları kapsamlı bir şekilde yürüten ülkelerin başında gelip bu ülkelerde topraksız veya çok az toprakla ve çok az su ile bitki yetiştirilmektedir. Yurdumuzda bu alandaki çalışmalar henüz deneme aşamasındadır (Tuncer ve Özkan, 2001).

Pomza, tarımda hem ucuz hem de özellikleri açısından bitkiler için önemli bir hammadde durumundadır. Tuttuğu suyu, nemi, içinde bulunduğu ortama göre ayarlayarak gereklikçe bitkiye verebilen pomzanın bu alanda kullanılabilmesi için, bazı özelliklerinin uygun olup olmadığının (su tutma faktörü, besin emme özelliği, gözenek durumu, granülleri, görünür yoğunluğu vb) analizi gerekmektedir. Bu analizlere geçilmeden önce tane boyutu açısından uygun, aynı özelliklerde rezerv miktarı belirlenmelidir. Bir diğer yandan sıvı gübre kullanımı konusunda, pomza gübre kaybını minimuma indirmesinin yanı sıra yeraltı su kaynaklarının kirlenmesine de engel olmaktadır (Tuncer ve Özkan, 2001).

Ayrıca pomza, süs bitkilerinin soğanlarının don olayından korunması amacıyla da kullanılır. Özellikle saksıda süs bitkisi yetiştiriciliğinde dünyada yaygın olarak kullanılan pomza, bu amaçla muhtelif boyutlarda tasnif edilerek 6 lt, 25 lt ve 40 lt'lik poliüretan torbalarda ve 1 ton'luk çuvallarda piyasaya sunulmaktadır. Bu konuda pazar payı olarak en önde gelen ülke Çin'dir (Gündüz ve Şapçı, 2005).

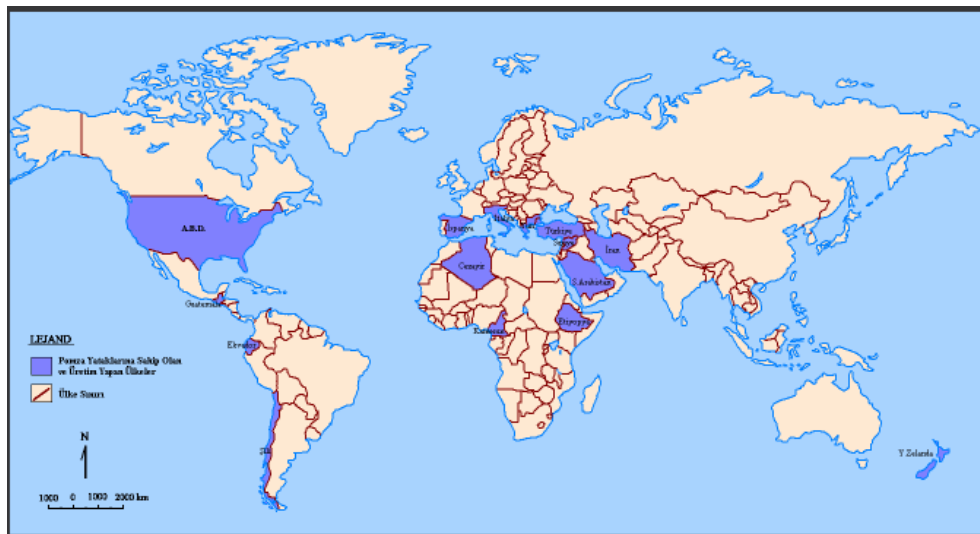
2.1.2.5. Diğer endüstriyel ve teknolojik alanlarda kullanımı

- Kuyumculuk ve plastik sanayinde abrazif,
- Televizyon tüplerinde ve elektronik devre çiplerinde hassas temizleme maddesi,
- Yüksek yol tutuşuna sahip kaymaz otomobil lastiklerinde katkı malzemesi,
- Karayollarında ki buzlanmaları engellemek amacıyla,
- Dekoratif ve yalıtımlı tavan kaplamalarının üretiminde,

Ve diğer çeşitli sektörlerde kullanım imkanı bulmaktadır. Ayrıca günümüzde seramik malzemelerinin sır tabaklarının yapımında, refrakter malzeme, hafif izo-akustik sıva imalinde, biyoteknoloji alanlarında absorban malzeme olarak ve su arıtım teknolojisi gibi pek çok alanda kullanımına ilişkin çalışmalarında sürdürüldüğü de bilinmektedir (Güngör ve Tombul , 1997).

2.1.3. Dünya ve Türkiye’de pomza potansiyeli

Pomza yatakları Dünya’daki volkanik alanlarda yoğunlaşmaktadır. Dünya genelinde görünür pomza rezervi 18 milyar ton civarındadır. Pomza yataklarının bulunduğu ülkelerin başında ABD, Türkiye ve İtalya gelmektedir (Şekil 2.5). Türkiye’deki pomza rezervi 2,8 milyar ton civarındadır. Buna göre Türkiye pomza rezervinin, Dünya pomza rezervinin %15,8’ine karşılık geldiği görülmektedir (Çizelge 2.2) (Elmastaş, 2012).

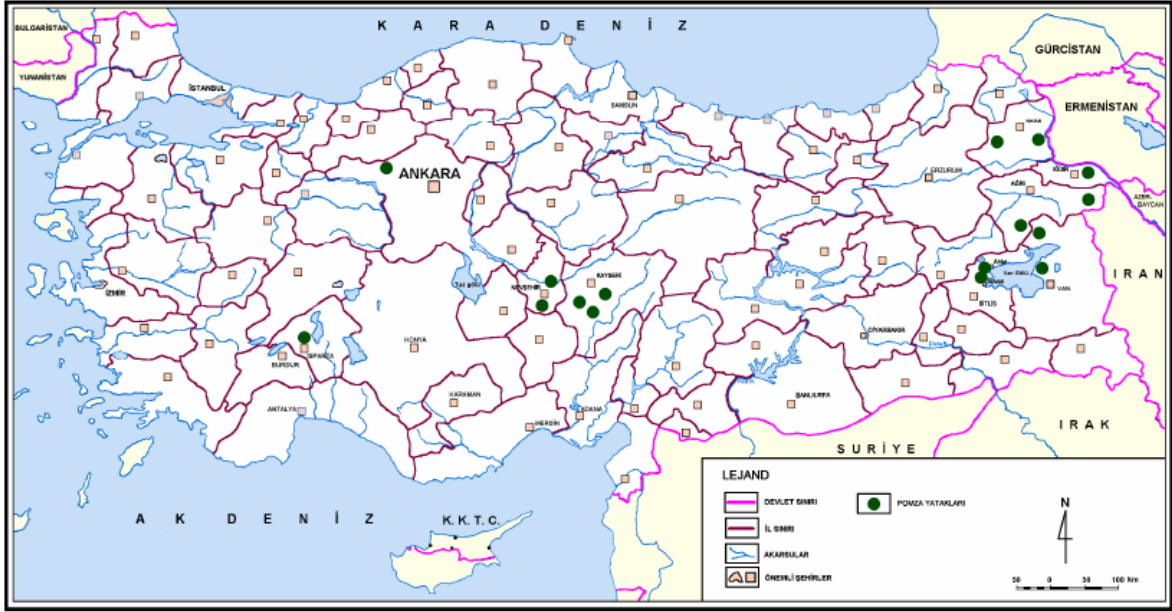


Şekil 2.5: Pomza yataklarının dünyadaki dağılımı. (Elmastaş, 2012)

Çizelge 2.2: Dünya pomza rezervleri. (Elmastaş, 2012)

Ülke	Rezerv Miktarı (Milyon Ton)	Oran (%)
ABD	11.500	63,9
Türkiye	2.836	15,8
İtalya	2.000	11,1
Yunanistan	500	2,8
Avustralya, Yeni Zelanda	500	2,8
Şili	60	0,3
Diğer	600	3,3
TOPLAM	17.996	100,0

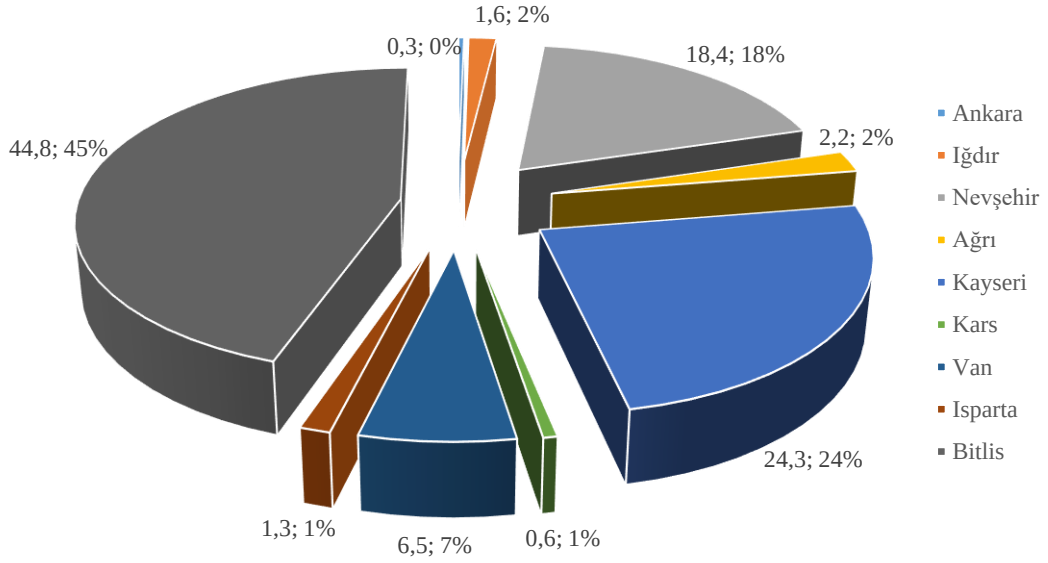
Türkiye’deki pomza rezervlerinin dağılımına bakıldığında, volkanik arazilerin yoğun olarak bulunduğu Doğu Anadolu ve İç Anadolu bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 2.6.). Pomza rezervinin en yoğun olduğu bölge Doğu Anadolu bölgesidir (%55,7). Geriye kalan pomza rezervi ise İç Anadolu bölgesinde bulunmaktadır (%44,3). İl bazında pomza rezervleri incelendiğinde ise Bitlis (%44,8), Kayseri (%24,3), Nevşehir (%18,4) ve Van (%6,5) illerinin en büyük paylara sahip olduğu görülmektedir (Şekil 2.7). Bu 4 ilin Türkiye’deki toplam pomza rezervinin %94’üne sahip olduğu görülmektedir. Pomza rezervi bulunan diğer şehirler ise Ağrı, Iğdır, Isparta, Kars ve Ankara şehirleridir (Çizelge 2.3) (Elmastaş, 2012).



Şekil 2.6: Türkiye'deki pomza yataklarının dağılımı. (Elmastaş, 2012)

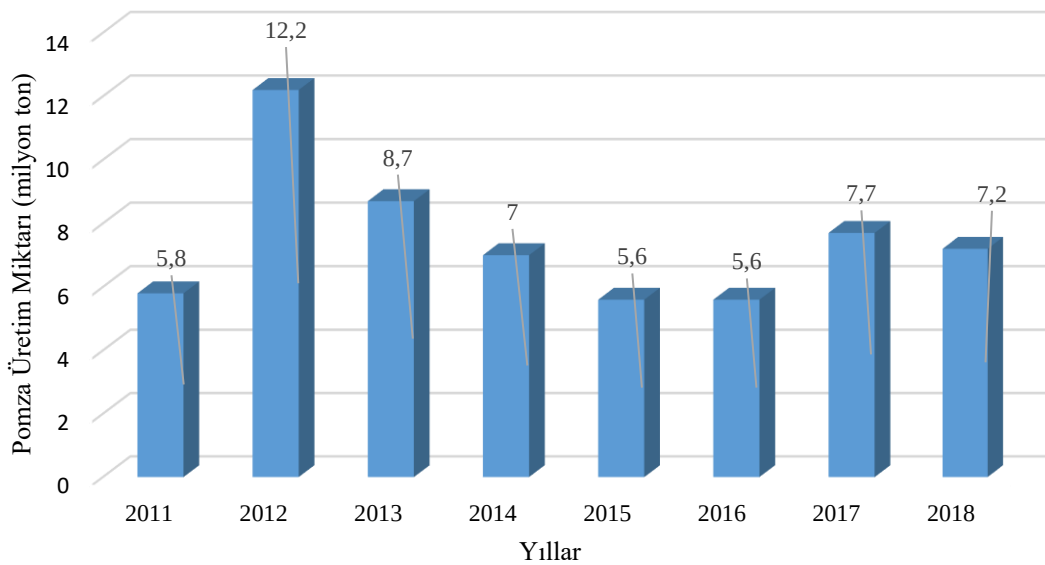
Çizelge 2.3: Türkiye pomza rezervleri. (Elmastaş, 2012)

İller	Rezerv Miktarı (Milyon m ³)
Bitlis	1.100
Kayseri	596,75
Nevşehir	453,07
Van	160,57
Ağrı	54,68
Iğdır	40,15
Isparta	30,98
Kars	13,59
Ankara	8,07
TOPLAM	2.457,88



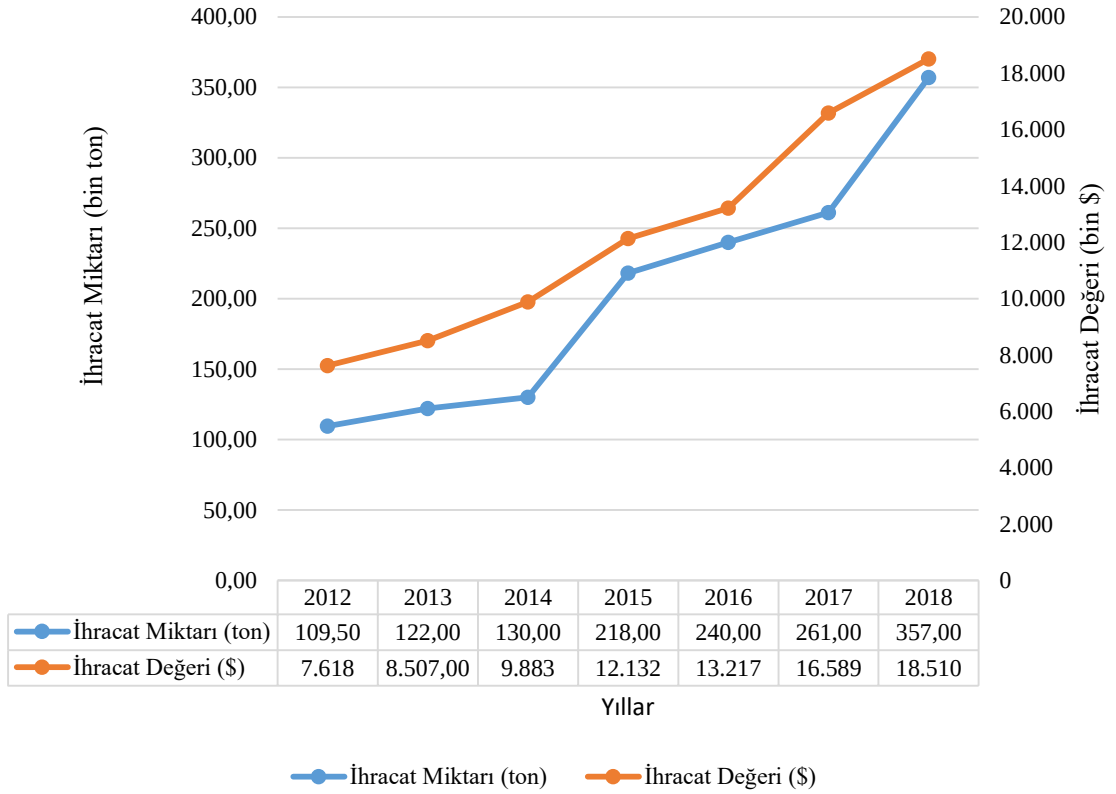
Şekil 2.7: Türkiye pomza rezervinin illere göre dağılımı. (Elmastaş, 2012)

Ülkemizin yıllık pomza üretimine bakacak olursak lineer bir artış veya azalış göstermediği anlaşılmaktadır. 2011 yılında yaklaşık 6 milyon ton pomza üretilirken bir yıl sonra 2012 yılında iki kat artış göstererek 12 milyon ton pomza üretildiği görülmektedir. Ancak daha sonra 2016 yılına kadar pomza üretiminde sürekli bir düşüş görülüp 2016 yılından sonra ise tekrar yükselerek üretimin yaklaşık 8 milyon tona ulaştığı görülmektedir (Şekil 2.8) (Anonim, 2020a).



Şekil 2.8: Türkiye'nin yıllara göre pomza üretimi. (Anonim, 2020)

Ülkemizin yıllara göre pomza ihracat miktar ve değerlerine bakacak olursak yıllık üretimin aksine ihracatta sürekli bir artış görülmektedir (Şekil 2.9) (Anonim, 2020b). Ancak ihracat miktarlarının üretime göre az olduğu da görülmektedir. 2012 yılından itibaren bakıldığında en az üretim yapılan 2016 yılında dahi yaklaşık 6 milyon ton pomza üretildiği ancak aynı yılda yapılan pomza ihracatının yaklaşık 240 bin ton olduğu bilinmektedir. Bu da bize yapılan pomza üretiminin ancak %4'ünü ihraç ettiğimizi %96'lık kısmını ise yurt içinde değerlendirdiğimizi göstermektedir (Çizelge 2.4).



Şekil 2.9: Türkiye'nin yıllara göre pomza ihracat miktarları ve değerleri. (Anonim, 2020b)

Çizelge 2.4: Yıllara göre pomza üretimi ile pomza ihracatı karşılaştırması. (Anonim 2020b)

Yıllar	Pomza Üretimi (bin ton)	Pomza İhracat Miktarı (bin ton)	İhracat/Üretim Oranı (%)
2012	12.281	109	0,89
2013	8.644	121	1,40
2014	6.966	129	1,86
2015	5.660	218	3,85
2016	5.637	239	4,25
2017	7.773	260	3,35
2018	7.259	356	4,91
TOPLAM	54.224	1.436	2,64

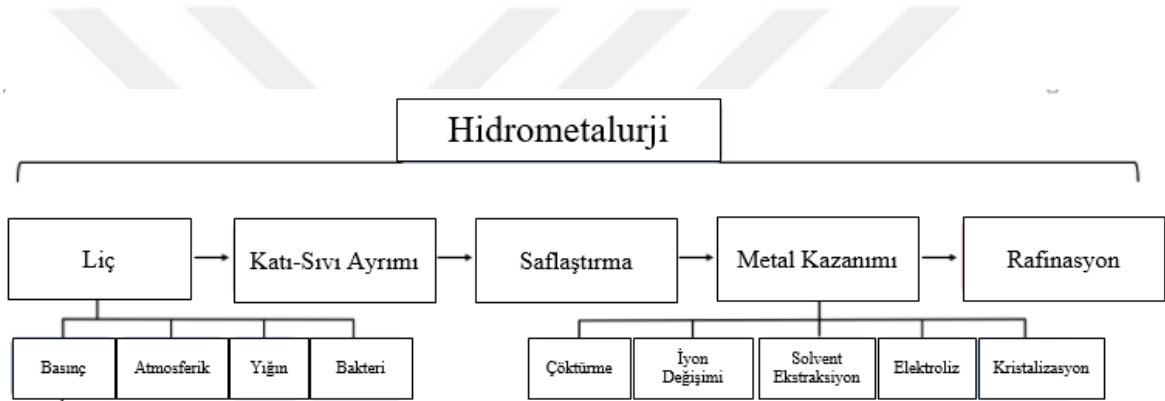
Çizelge 2.4.'e bakıldığında pomza ihracatının üretime oranının genel olarak artış göstermekte olduğu ancak 2016 yılından 2017 yılına geçişte azaldığı bu yıldan sonra ise tekrar arttığı görülmektedir. Ayrıca toplam ihracat miktarının, toplam pomza üretimine oranının %2,64 olduğu görülmektedir (Anonim, 2020b)

Ayrıca ülkemizde ve dünyada üretilen pomzanın tüketim alanları ve tüketim miktarlarına da bakılacak olursa, ülkemizde yıllık ortalama 6 milyon ton pomza üretilmekte ve üretilen pomzanın yaklaşık %90'ı inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Dünyada ise yılda ortalama 17 milyon ton pomza üretilmekte (Şahiner ve Eroğlu, 2020) ve üretilen pomzanın yaklaşık %72'si inşaat sektöründe kullanılmaktadır (İlter, 2010).

2.2. Hidrometalurji

Hidrometalurji, çeşitli sulu çözelti ortamlarında cevher veya mineraldeki metalik bileşimlerden metal kazanımı yöntemidir. Hidrometalurji işlemi, asit, baz veya tuz ortamında yapılabilir. Hidrometalurjik yöntemlere doğrudan başlanabileceği gibi çeşitli ön işlemlerden sonra da başlanabilmektedir (Özer, 2012).

Hidrometalurji yönteminde uygun çözelti kullanılarak cevher veya mineral içerisindeki metaller çözünerek çözeltiye geçerken metalik olmayan gang mineralleri filtrasyon işlemi kullanılarak çözeltiden ayrılır ve böylelikle metal eldesi sağlanmış olur (Arık, 2009). Hidrometalurji aşamaları Şekil 2.10’da verilmiştir.



Şekil 2.10: Hidrometalurji aşamaları. (Anonim, 2021d)

2.2.1. Liç işlemi

Cevher veya mineral içerisindeki metallerin, uygun bir çözücü ortamında çözünürlük farkından yararlanılarak seçimli olarak çözündürülmesi ve kazanılmasına “liç” denilmektedir (Önal, 1985). Liç işlemlerinde önemli olan üç temel şart bulunmaktadır. Bunlar;

- Seçimlilik: Liç reaktifinin, kazanılmak istenen değerli metale selektif olarak etki etmesidir. Böylece, harcanan reaktif miktarı azaltılacak ve maliyet düşürülmüş olacaktır. Ayrıca temiz bir çözelti elde edilerek liç sonrası işlemlerde kolaylık sağlanacaktır.
- Hız: Kurulacak tesisin hacmine direk olarak etki etmektedir.

- Etkinlik: Liç işleminin etkinliği, bütün üretim maliyetlerini etkilediğinden, değerli metalin çözeltiye alınması, reaktif seçimi ve uygun ortam şartlarının belirlenmesi gibi işlemlerde yüksek verimlilik sağlamaktadır (Canbazoglu ve diğ, 1985).

Liç işlemi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler;

- Yerinde liç,
- Yığın liçi,
- Tank liçi,
- Karıştırma liçi,
- Basınç liçi,
- Bakteri liçidir.

Liç yöntemleri uygulanış şekillerine göre sınıflandırılmaktadır. Liç yöntemi belirlenirken cevher tenörüne, cinsine, miktarına, içeriğinde bulunan gang minerallerinin çözünürlüğü ve tüketeceği asit miktarı gibi parametrelere dikkat edilmektedir (Ulu, 2019). Çizelge 2.5'te liç yöntemlerinin sınıflandırılması verilmiştir (Aydoğmuş, 2019).

Çizelge 2.5: Liç yöntemlerinin sınıflandırılması. (Aydoğmuş, 2019)

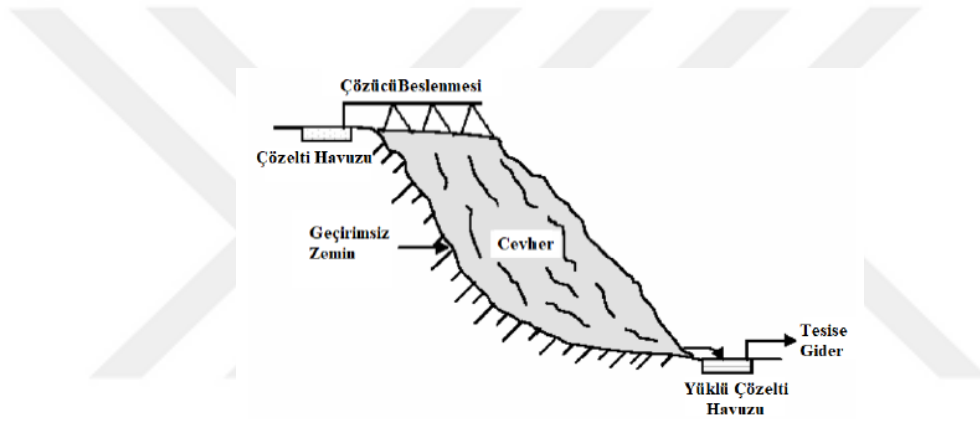
Yöntem	Tane Boyutu	Süre	Maliyet
Yerinde Liç	Gerektiği durumlarda gevşetilmiş cevher	Yıllar	Düşük
Hazırlıklı Yığın Liçi	Kırılmış cevher	Ay	Düşük
Hazırlıksız Yığın Liçi	İşlem görmemiş cevher	Yıl	Düşük
Tank Liçi	< 10 mm	Hafta	Yüksek
Karıştırma Liçi	< 0,5 mm	Gün	Yüksek
Basınç Liçi	<0,5 mm	Gün	Yüksek

2.2.1.1. Yerinde liç

Yerinde liç işlemi, maliyetleri karşılayamayacak kadar düşük tenörlü cevherlerin üretimi için kullanılan bir yöntemdir. Cevher, direkt olarak ocakta çözücülerle muamele edilerek metal kazanımı yapılmaktadır. Bu yöntem genellikle terk edilmiş veya kullanımı bırakılmış yataklarda kullanılmaktadır (Ulu, 2019). Bilinen klasik madencilik yöntemleri ile

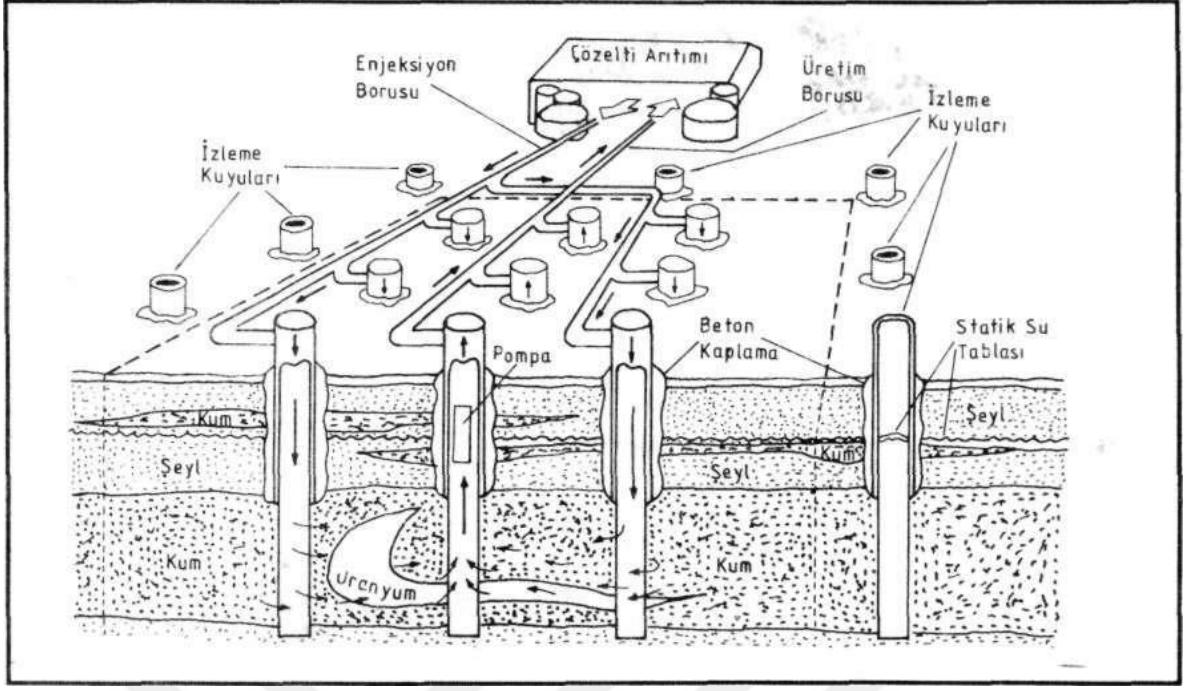
düşük tenörlü kaynakların ekonomik olarak kullanılmasına olanak vermektedir. Bu nedenle yerinde liç yöntemi kullanılarak diğer düşük tenörlü cevherlerinde üretilebileceği gündeme gelmiştir (Anderson ve Richie, 1968; Marrs, 1970; White, 1975)

Yerinde liç yönteminde cevher yatağında parçalanır ve hidrostatik basınç ortamında oksijen takviyesi yapılarak çözücüyle tepkimeye girmesi sağlanır. Çözücü olarak genellikle sülfirik asit kullanılmaktadır. Yöntemden verim alınabilmesi için, başlangıcından bitişine kadar yaklaşık 5-10 yıllık bir zaman geçmesi gerekmektedir. Yeterli sürenin geçmesinin ardından kuyularda toplanan çözelti dışarıya pompalanır. Çözeltinin kuyulardan sızmamaması için kuyuyu oluşturan kayaçların geçirimsiz olması istenir. Şekil 2.11’de yerinde liç işlemi şematik olarak gösterilmiştir (Ulu, 2019).



Şekil 2.11: Yerinde liç işlemi şematik görüntüsü. (Ulu, 2019)

Yerinde liç yöntemi altın, gümüş, uranyum, okside bakır, trona, tuz gibi klasik yöntemlerle üretimi ekonomik olmayan cevherlerde kullanılmaktadır. Yerinde liç uygulaması yüzeysel veya derin maden yataklarında kullanılabilir. Bu durumda açık ve kapalı işletme şeklinde yerinde liç uygulamaları yapılabilir. Yeraltı uranyum cevherinin yerinde liç uygulaması Şekil 2.12’de görülmektedir (Girgin ve Baser, 1990).



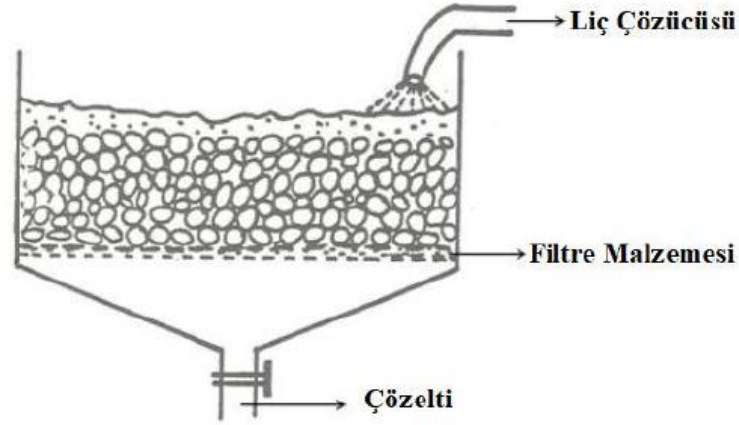
Şekil 2.12. Uranyum cevheri yerinde liç uygulaması. (Girgin ve Baser, 1990)

Madencilikte az maliyet çok kazanç ilkesi önemli olduğundan üretim yönteminin ekonomikliği önem arz etmektedir. Bu bağlamda yerinde liç uygulamaları ekonomik açıdan incelenmiştir (Azis, 1976).

Yerinde liç yöntemi ekonomik değerlendirmesi amacıyla 4536 ton rezerve sahip bir uranyum yatağı üzerinde, derinlik, rezerv, tenör değişkenleri dikkate alınarak yapılan bir ekonomik değerlendirme çalışmasında yerinde liç uygulamasının ekonomik açıdan açık işletme üretim yöntemiyle rekabet edebileceği görülmüştür (Girgin ve Baser, 1990)

2.2.1.2. Süzülme veya tank liçi

Tabanı süzgeç görevi üstlenen geçirgen özelliğe sahip bir malzeme ile kaplanmış beton bir tank içerisinde yapılan liç işlemine süzülme liçi adı verilir. En az %1-2 tenöre ve 1 cm tane boyutuna sahip cevherlerde uygulanmaktadır. Çözücü ve cevher tank içerisine ilave edilerek liç işlemine başlanmaktadır. Çözücü isteğe göre tanka üstten veya alttan beslenebilir. Daha çok altın, bakır, uranyum gibi cevherlerin liç işlemlerinde kullanılmaktadır. Şekil 2.13'te süzme liçi düzeneği görülmektedir (Kökeş, 2013).



Şekil 2.13. Süzülme Liçi Düzenegi. (Kökeş, 2013)

Çok çeşitli cevher türlerine yaygın olarak uygulanan karıştırmalı tank liçi, 200 yıldan fazla bir süredir kullanılmaktadır. Süzme işlemi çelik tanklarda yapılır ve katılar hava ile süspanse edilir veya mekanik çalkalama yapılır. Konik tabanlı liç tanklarındaki hava ve siyanürleme işleminin ilk yıllarında siyanürleme ile karıştırma yaygın olarak kullanılmıştır; ancak mekanik karıştırma daha az enerji gerektirir ve daha iyi karıştırma verimliliği sağlar. Bu nedenle mekanik karıştırma bu uygulamanın yerini büyük ölçüde almıştır. Tek bir reaktörde iyi ve mükemmel karıştırma koşullarına yaklaşılabılır. Bu koşullar, liç ekipmanından en iyi şekilde yararlanmaya yardımcı olmaktadır (Sarıkaya, 2018)

Tanklardaki yoğun pülp nedeniyle karıştırma esnasında karışmadan kalan katılar olmakta ve akışta problemler yaşanabilmektedir. Bu durumda metal kazanımını maksimum düzeye çıkarmak için liç parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Optimize edilmesi gereken liç parametreleri; tane boyu, pülp yoğunluğu, pH, çözücü derişimi, oksijen miktarı ve kalma süresidir (Sarıkaya, 2018).

Tank liçinde genel olarak liç edilecek malzeme -150 μm tane boyutuna öğütülmektedir. Buna karşın ön liç işlemleri yapıldığı durumlarda tane boyutu %80 oranında -20-25 μm 'ye de indirilmektedir. Özellikle refrakter ve sülfür mineral kafes yapısındaki altın liçlerinde tane boyutu 7 ile 10 μm arasına kadar indirilmektedir (Sarıkaya, 2018). Bu derece düşük tane boyutlarında öğütmenin yapıldığı ilk tesislerden birisi Avustralya'da bulunan Kalgoorlie altın madenidir. Tesiste, sülfür konsantresinin tane boyu -10 μm 'ye indirilmiş ve malzeme kavurma işlemine beslenmiştir (Ellis ve Gao, 2002).

Liç verimini önemli ölçüde etkileyen parametrelerden biriside pülp yoğunluğudur. Bu kapsamda liç işlemi genellikle %35-50 arası katı oranıyla gerçekleştirilmektedir. Çözücü

derişimiyle birlikte düşünülmesi gerektiğinden katı oranının optimum düzeyde tutulması gerekmektedir. Katı oranının az, çözücü miktarının fazla olduğu durumlarda gereksiz çözücü tüketimi olmaktadır, benzer şekilde katı miktarının çok fazla olduğu durumlarda ise çözücü miktarı arttırılmadığı takdirde çözünmeden kalan metaller olabilmekte ve liç verimi düşmektedir (Sarıkaya, 2018).

Özellikle altın madenlerinde alkaliteyi muhafaza etmek ve siyanürün aniden sistemi terketmesine engel olmak amacıyla pH 10-11 aralığında tutulmaktadır. Metallerin çökme ve çözeltiye geçme pH'ları önemli olduğundan genel anlamda tüm liç sistemlerinde pH etkili bir parametredir (Sarıkaya, 2018).

Ayrıca tanklardaki oksijen ihtiyacını karşılamak amacıyla tank içerisine hava beslemesi de yapılmaktadır. Tanklara beslenen saf oksijen derişimi genel olarak 25 °C'de deniz seviyesinde 8,2 mg/L O₂ olacak şekilde ayarlanmaktadır (Vivienne ve diğ, 1989).

Belirleyici faktörlerden biriside liç süresidir. Liç süresi liç edilecek malzemenin özelliklerine bağılı olarak değişmekte ve deneysel yöntemlerle belirlenmektedir. Liç süresi diğher bütün liç parametrelerinden de etkilenen bir yöntem olduğundan birkaç saat veya birkaç gün olabilmektedir (Sarıkaya, 2018)

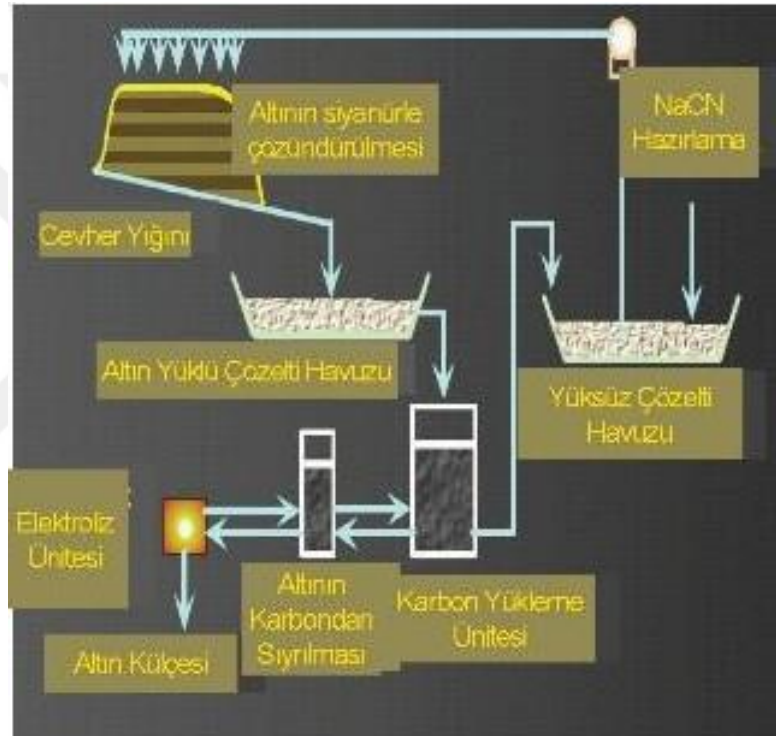
2.2.1.3. Yığın liçi

Yığın liçi, önceden hazırlanmış geçirimsiz bir zemin üzerine cevher yığını oluşturularak bu yığının üzerine uygun bir çözücü gönderilerek kazanılmak istenen malzemenin çözeltiye alınması esasına dayanan bir yöntemdir. Yığın hazırlanmadan önce cevher hazırlama işlemlerine tabi tutulmuşsa buna hazırlıklı yığın liçi, herhangi bir işleme tabi tutulmamışsa buna da doğrudan yığın liçi adı verilmektedir (Girgin, 1989).

Yığın liçi, özellikle alışlagelmiş yöntemlerle kazanılamayan düşük tenörlü cevher ve atıkların ekonomik olarak değerlendirilebilmesine olanak sağlaması nedeniyle önem kazanmıştır. Yığın liçi, özellikle yüksek rezervli, düşük tenörlü altın cevherlerinin üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Girgin ve Kırşan, 1990).

Yığın liçi yönteminden en yüksek faydayı sağlamak amacıyla yığın alanına serilen cevherin, siyanür tüketimine neden olan karbonlu malzeme içermemesi gerekmektedir. Yığın üzerine beslenen sodyum siyanür (NaCN) çözeltisi birkaç gün içerisinde yığın

tabanına ulaşır buradan yüklü çözelti havuzlarına oradan da tesiste bulunan karbon tanklarına pompalar vasıtasıyla basılmaktadır. Karbon tanklarına gelen yüklü NaCN çözeltisi içerisinde bulunan altın, karbon tarafından soğurulmakta ve karbonun sürüm işlemi neticesinde sıyırma kolonuna ulaşır ve karbon üzerindeki altının sıyırma işlemi yapılır. Yüksüz çözelti tekrar kullanılmak üzere yüksüz çözelti havuzuna, yüksüz karbonlar ise karbon rejenerasyon fırınlarına gönderilir. Sıyırma kolonunda sıyrılan altın ise elektroliz ünitesine beslenerek altın üretimi sağlanmaktadır. Yığın liçi yöntemiyle altın üretimi genel akım şeması Şekil 2.14’te görülmektedir (Rashidi, 2020).

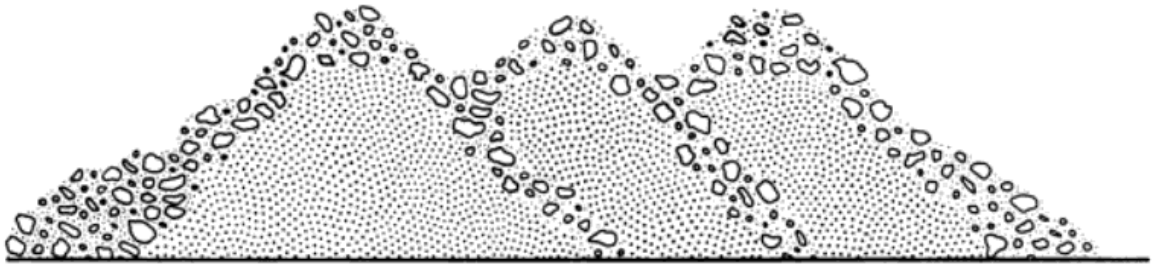


Şekil 2.14. Yığın liçi yöntemiyle altın üretimi genel akım şeması. (Rashidi, 2020)

Yığın liçi yönteminde yığın hazırlanması çok büyük önem arz etmektedir. Liç işleminden maksimum verimi alabilmek için yığının düz veya eğimli bir alanda hazırlanması ve üzerine yığın yapılacak alanın beton, mıcır ve membran gibi geçirimsiz bir yüzey olması gerekmektedir. Ocaktan çıkarılan cevherin yığın alanına beslenmesi kamyonlar veya taşıyıcı bantlarla gerçekleştirilmektedir. Yığın üzerine püskürtme veya damlatma yöntemiyle beslenen siyanürün çözelti havuzlarına alınmasında yığın alanı eğimi çok önemli bir parametredir. Ayrıca çözelti havuzuna yüklü siyanür çözeltisinin gönderilmesini sağlayan boruların paslanmaz çelik veya plastik yapıda olması gerekmektedir. Bununla beraber

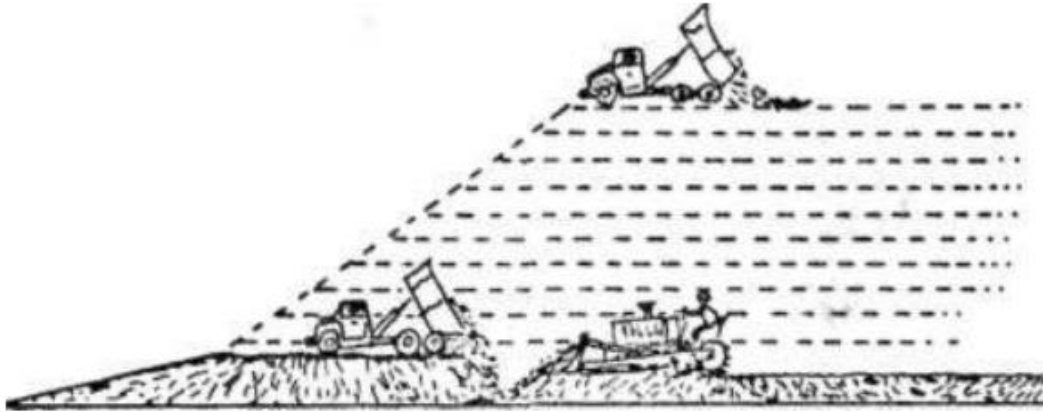
siyanür akışının da düzenli olması gerekmektedir. Aksi takdirde siyanür altınla yeterince temas edemeyecek ve liç verimi düşecektir (Girgin ve Kırşan, 1990).

Yığın hazırlanması esnasında iri ve ince tanelerin ayrılmaya uğramadan homojen şekilde dağılması sağlanmalıdır. Aksi takdirde iri tanelerin düzensiz hareketinden kaynaklı olarak yatay yönde geçirimsiz bir tabaka oluşacak liç verimi olumsuz etkilenecektir (Şekil 2.15) (Girgin, 1989).



Şekil 2.15: İnce ve iri tanelerin ayrışması. (Heinen, 1980)

Ayrıca yığının, alana tabakalar şeklinde serilmesi de liç verimini olumsuz yönde etkilemektedir. Tabakalar halinde serilen yığın sıkışarak geçirimsiz bir yüzey oluşturacak ve bunun sonucunda beslenen siyanür çözeltisi cevhere yeterince temas edemeyecektir (Girgin, 1989).



Şekil 2.16: Yığının tabakalar halinde serilmesi. (Girgin, 1989)

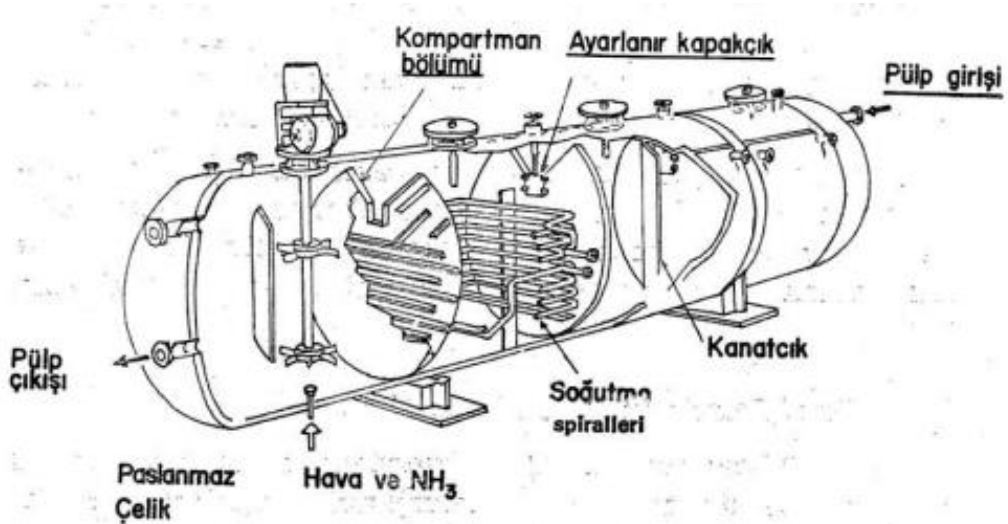
Yığın liç verimini arttırmak amacıyla yığın hazırlanması dışında da önem arz eden liç parametreleri bulunmaktadır. Cevher tipi, çevresel etkenler, yığın geçirgenliği, yığın kat

yüksekliği, çözelti akış hızı, liç süresi gibi etkenler liç verimini etkileyen başlıca parametrelerdir (Kappes, 2005).

2.2.1.4. Basınç liçi

Basınç liçi, yüksek basınç, yüksek sıcaklığın yanında oksitleyici gazların da kullanılabildiği, hem asidik hem bazik ortamlarda gerçekleştirilebilen bir yöntemdir. Bu işlemde en önemli etkenler pH ve sıcaklık olmaktadır. Ayrıca otoklav iç yüzeyinin de yüksek basınç ve sıcaklığa dayanıklı olması gerekmektedir (Özboz, 2017).

Basınç liçi çoğunlukla çözünmesi zor olan refrakter malzemelerin çözeltiye alınmasında kullanılmaktadır. Basınç liçi için yatay, dikey, küresel ve tüp otoklavlar kullanılabilmektedir (Çiçekli, 2013). İşlem için kullanılan otoklavlarda buhar basıncıyla mekanik şekilde veya otoklavın döndürülmesi şeklinde karıştırma işlemi yapılmaktadır. Endüstride kullanılan otoklavların hacmi 400 m³ olup, çalışma basınçları ise 25-50 bar aralığındadır. Fiziksel ve kimyasal etkilere karşı dayanıklı olması amacıyla otoklavlar titanyum ve çelik alaşımlardan imal edilmektedir (Habashi, 1997). Endüstriyel kullanım amacıyla tasarlanan Sherrit-Gordon otoklavı Şekil 2.17’de gösterilmiştir (Çiçekli, 2013).



Şekil 2.17: Sherrit-Gordon otoklavı. (Çiçekli, 2013)

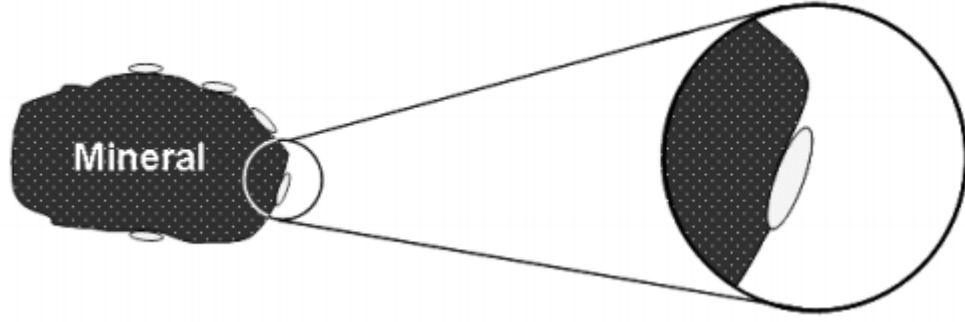
Basınç liçi, oksijenli veya oksijensiz ortamda gerçekleşebilmektedir. Oksijensiz ortam gerçekleştirilen basınç liçi işleminde, normal sıcaklıklarda çözünme hızı düşük olmaktadır. Çözünme hızını arttırmak için çözelti sıcaklığının kaynama noktasının üzerinde olması gerekmekte bunu sağlamak içinde çözeltinin buhar basıncı kullanılmaktadır. Oksijenli veya havalı ortamda ise çözünme hızı oksijenin kısmi basıncına bağlıdır. Belli bir sıcaklıkta oksijenin kısmi basıncının artması nedeniyle çözünme hızı da artmaktadır (Habashi, 1997).

Basınç liçi asidik veya bazik olarak yapılabilmektedir. Metal sülfürlerin ve örnek olarak kalkopirit mineralinin, asidik ve oksijenli ortamdaki basınç liçi sırasında oluşan genel reaksiyon denklemleri Çizelge 2.6’da verilmiştir (Habashi, 1970).

Çizelge 2.6: Metal sülfürlerin ve kalkopirit mineralinin basınç liçi reaksiyon denklemleri.

$\text{MeS(k)} + \text{H}_2\text{SO}_4 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{MeSO}_4 + \text{H}_2\text{O(s)} + \text{S}^0(\text{k})$
$2\text{CuFeS}_2(\text{k}) + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + 5/2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CuSO}_4(\text{çöz}) + \text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{S}^0(\text{k}) + 2\text{H}_2\text{O}$

Ayrıca basınç liçinin avantaj ve dezavantajlarına bakılacak olursa, yüksek sıcaklık ve basıncın yanında oksitleyici gazlarında etkisiyle atmosferik liç yöntemlerine göre daha avantajlıdır (Habashi, 1970). Bir diğer avantajı ise işlem sırasında demirin, demir (III) hidroksit olarak çökmesi ve yükseltgenme özelliği nedeniyle bir miktar iyonun ortamda kalması fayda sağlamaktadır. Ancak basınç liçinin avantajlarının yanında ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin yüksek olması en büyük dezavantajıdır (Çiçekli, 2013). Basınç liçi genel şematik akım şeması Şekil 2.18’de görülmektedir (Demirel, 2020).



Şekil 2.19: Bakterilerin mineral yüzeyine tutunması (Silverman, 1967)

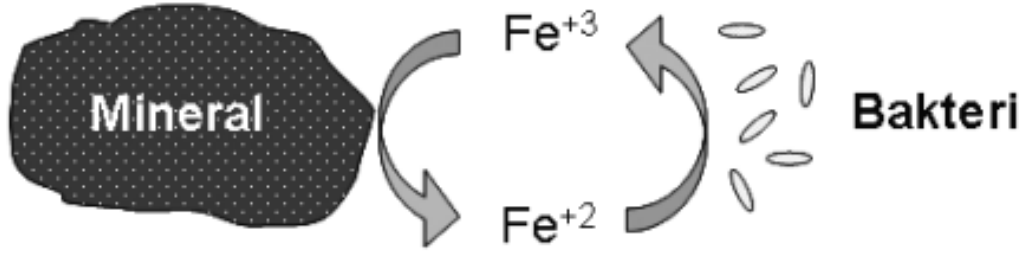
Doğrudan bakteriyel liç işleminde herhangi bir ara ürün oluşmadan sülfürlü mineraller bakteriler tarafından oksitlenmektedir. Bakterilerin sülfürlü mineralleri oksitleme reaksiyonları Çizelge 2.7’de verilmiştir (Akçıl ve Çiftçi, 2006).

Çizelge 2.7: Sülfürlü minerallerin doğrudan bakteriyel liç reaksiyonu. (Akçıl ve Çiftçi, 2006)

$\text{FeS}_2 + 7/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$\xrightarrow{\text{Bakteri}}$	$\text{FeSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$
$\text{CuS} + 2\text{O}_2$	$\xrightarrow{\text{Bakteri}}$	CuSO_4
$\text{ZnS} + 2\text{O}_2$	$\xrightarrow{\text{Bakteri}}$	ZnSO_4

Genel olarak asidik ortamda çözünmeyen kovelin (CuS), kalkosin (Cu₂S), galen (PbS), sfalerit (ZnS), molibdenit (MoS₂) gibi metal sülfürlerin Acidithiobacillus ferrooxidans türü bakteriler tarafından oksitlenebileceği keşfedilmiştir (Torma, 1977).

Dolaylı bakteriyel liç işleminde ise sülfürlü minerallerin oksidasyonu doğrudan bakteriler tarafından değil genellikle sülfürlü mineraller ile birlikte bulunan piritin bakteriyel liçi sonucu açığa çıkan Fe³⁺ iyonları tarafından gerçekleşmektedir (Dutrizac & MacDonald, 1974). Dolaylı bakteriyel liç işlemi şematik görüntüsü Şekil 2.20’de gösterilmiştir (Fowler ve diğ, 2001).



Şekil 2.20: Dolaylı bakteriyel liç işlemi şematik görüntüsü. (Fowler ve diğ, 2001)

Sülfürlü minerallerin Fe^{3+} iyonları tarafından oksitlenmesi reaksiyonları Çizelge 2.8’de verilmiştir (Dutrizac ve MacDonald, 1974).

Çizelge 2.8: Sülfürlü minerallerin Fe^{3+} iyonları tarafından oksitlenme reaksiyonları.

1	$2\text{FeS}_2 + 15/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{Bakteri}} \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$
2	$\text{MeS} + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \xrightarrow{\text{Kimyasal}} \text{MeSO}_4 + 2\text{FeSO}_4 + \text{S}^0$
3	$2\text{FeSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 + 1/2\text{O}_2 \xrightarrow{\text{Bakteri}} \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{O}$
4	$\text{S}^0 + 3/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{Bakteri}} \text{H}_2\text{SO}_4$

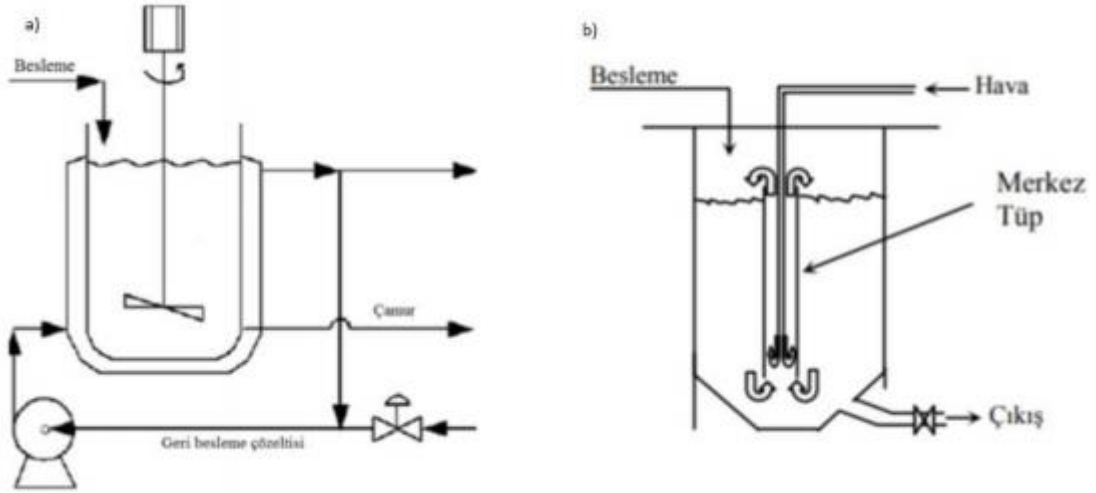
2 nolu reaksiyon sonucu açığa çıkan Fe^{2+} , 3 nolu tepkimeye göre bakteriler tarafından tekrar Fe^{3+} iyonlarına oksitlenebilir ve böylece tekrar liç işlemine katılabilir. Buna göre dolaylı bakteriyel liç işleminde bakterilerin yalnızca katalizör görevi gördüğü anlaşılmıştır (Akçıl ve Çiftçi, 2006).

2.2.1.6. Karıştırma liçi

0,5 mm tane boyutunun altına düşürülmüş bir cevherde %40-70 arası katı oranı olacak şekilde cevherin hazırlanmasıyla işleme başlanmaktadır. Bu işlemde yeterli çözünme meydana gelinceye kadar karıştırma işlemi yapılmaktadır. Karıştırma işlemi mekanik, pnömatik ve mekanik-pnömatik yöntemler bir arada kullanılarak yapılabilmektedir (Özboz, 2017).

Karıştırma liçi %0,8 ile 5 arasında tenöre sahip oksitli bakır cevherlerinde de kullanılabilir. 3-50 mm arası tane boyutlarında uygulanabilir. Liç işleme öncesi yapılan cevher hazırlama işlemleri ve yatırım maliyetleri açısından diğer liç yöntemlerine kıyasla pahalı bir yöntemdir. Bu yöntemde katı-sıvı ayrımı amacıyla genellikle ters akımlı

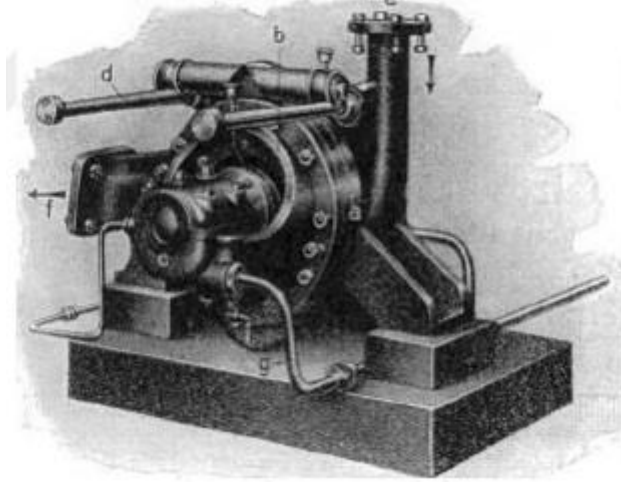
dekantasyon kullanılmaktadır. Liç süresi, karıştırma hızı, pH, çözülmüş oksijen, karıştırıcı tipi, çözelti/katı oranı gibi parametreler karıştırma liçi verimini etkileyecek parametrelerdir. Kullanılan çözücü geri kazanılabilir ve böylece çevresel zararlar önlenabilir. Liç sonrası çözünen ağır metallerin kontrollü olarak uzaklaştırılabilmesi çevresel etkileri önleyebilecektir. Karıştırma liçi ile parçacık yüzeyinde meydana gelen difüzyon etkileri de yok edilebilmektedir. İstenen metalin kazanılması diğer liç yöntemlerine kıyasla daha kolay ve kısa sürelerde olmaktadır (Tanaydın, 2018). Ancak basınçlı liç yöntemlerine kıyasla liç süresi daha uzun olmaktadır. Kesikli veya sürekli prosesler halinde uygulanabilmektedir. Karıştırma liçi Şekil 2.21’de görülmektedir. (Demirel, 2020).



Şekil 2.21: Karıştırmalı tank prosesi a) mekanik karıştırmalı b) pnömatik karıştırmalı.
(Demirel, 2020)

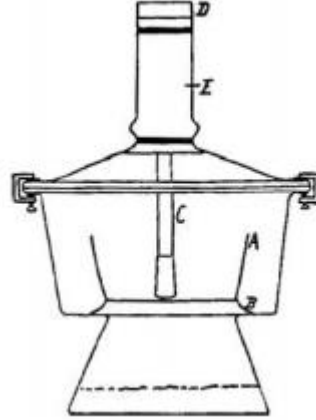
2.3. Mekanik Aktivasyon

Mekanokimya, mekanik enerji yardımıyla malzemelerin fizikokimyasal ve kimyasal yapısındaki değişimleri ele almaktadır. Mekanokimya tanımı ilk olarak 1887 yılında bilim insanı Ostwald tarafından kullanılmıştır. Ostwald’a göre mekanokimya, termokimya, elektrokimya, ve fotokimyanın bir parçasıdır. Ostwald, ayrıca yaş öğütme için kolloidal değirmeni de geliştirmiştir (Şekil 2.22.) (Uysal, 2018).



Şekil 2.22: Yaş öğütme için koloidal değirmen. (Pierce, 1928)

Ayrıca Amerikalı bilim insanları Parker ve Lea öğütme vasıtasıyla katı-katı tepkimeler üzerine çalışmış ve ilk mekanokimyasal öğütme reaktörünü geliştirmişlerdir (Şekil 2.23.) (Uysal, 2018).



Şekil 2.23: İlk mekanokimyasal reaktör, A: havan, B: demir halka, C: havan tokmağı. (Uysal, 2018)

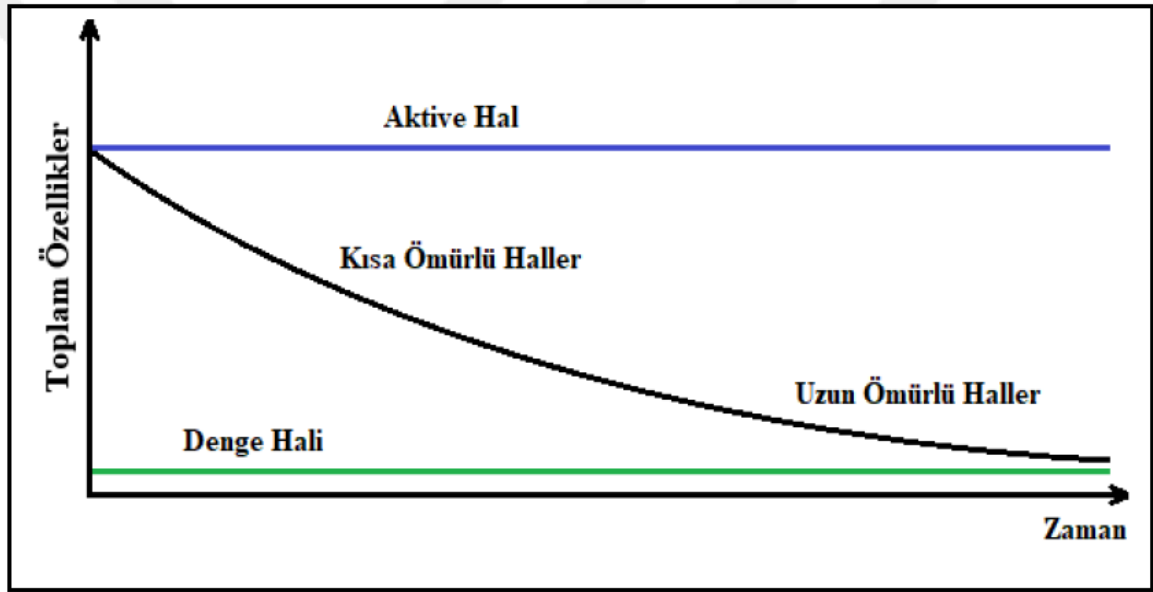
Havan tokmağı ile elle uygulanan yırtılma gerilmelerinin bilinen basınç etkilerinden farklıdır. Uygulanan gerilmeler sonucunda reaksiyona giren katılarda bölgesel veya yüzeysel ergimeler meydana gelmektedir (Ayna Çakır, 2019).

Mekanik aktivasyon cevher veya minerallerde, parçalanma ve kırılma, yeni yüzeylerin oluşumu, yüzey alanının artması, yüzeysel agregasyon, yüzeysel oksitlenme gibi etkilere sebep olmaktadır (Şener, 2012).

Değişmeden kalabilen bir katının, tepkimeye girme yeteneğini arttıran proses mekanik aktivasyon olarak tanımlanmaktadır (Smekal, 1942). Mekanik aktivasyon işlemi yapıda değişikliğe neden oluyorsa buna mekanokimyasal reaksiyon adı verilmektedir. Bu bağlamda mekanik aktivasyonla reaksiyon hızı artmakta ancak reaksiyonun gerçekleşme düzenine herhangi bir etki yapmamaktadır (Yürüyen, 2011).

Mekanik olarak aktifleştirilmiş bir katının davranışları, yapısal düzensizlik, yapısal gevşeme ve yapısal değişkenlik olmak üzere üç yönden ele alınabilmektedir (Butyagin, 1973).

Mekanik olarak aktifleştirilmiş bir katının davranışları, yapısal düzensizlik, yapısal gevşeme ve yapısal değişkenlik olmak üzere üç yönden ele alınabilmektedir (Butyagin, 1973). Şekil 2.24’de mekanik olarak aktifleştirilmiş katıların genelleştirilmiş gevşeme eğrisi gösterilmiştir (Balaz, 2000).



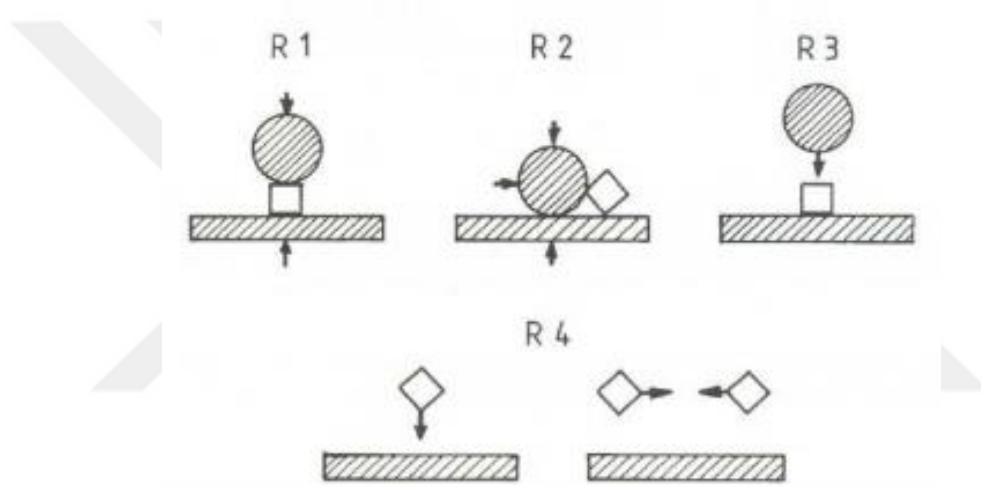
Şekil 2.24: Aktifleştirilmiş katıların genelleştirilmiş gevşeme eğrisi. (Balaz, 2000)

Mekanik aktivasyon süreçleri birincil ve ikincil süreçler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Birincil süreçler minerallerin reaktifliğini (iç ve yüzey enerjisinin artması, yüzey alanının artması, mineralin kohezyon enerjisinin azalması gibi) arttıran süreçlerdir. İkincil süreçler ise öğütme sırasında kendiliğinden oluşan veya öğütme tamamlandıktan

sonra bile ortaya çıkabilen (aglomerasyon, yüzesoğurum, yeniden kristallenme vb.) süreçlerdir (Juhasz, 1974).

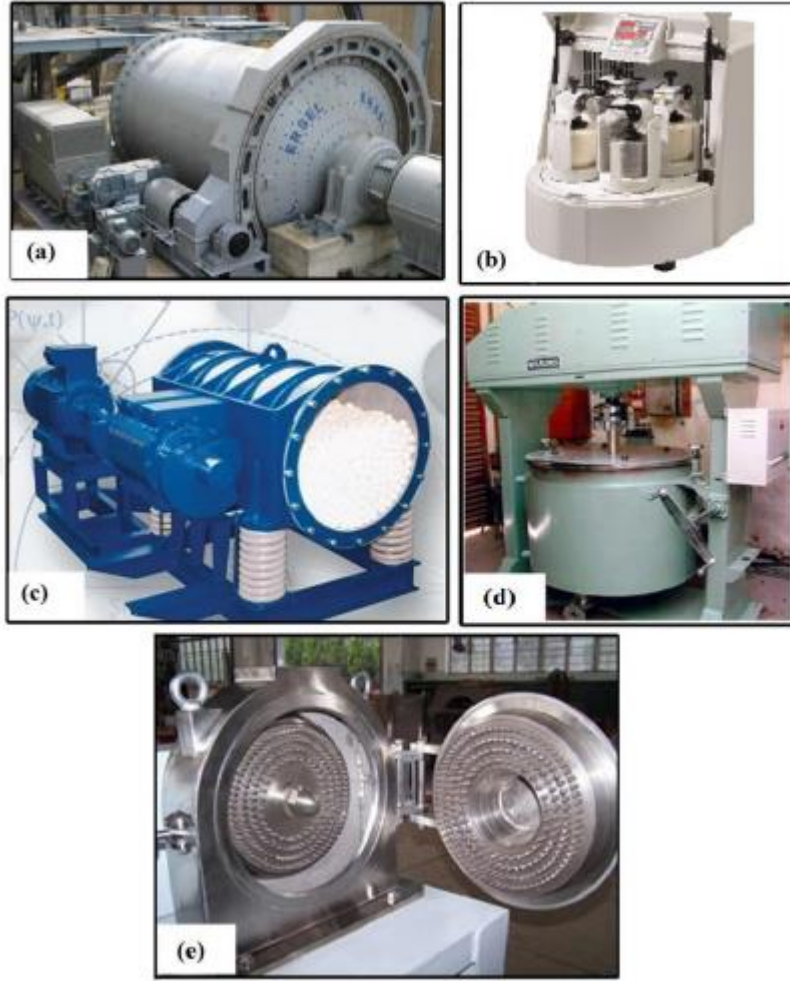
2.3.1. Mekanik aktivasyon ekipmanları

Mekanik aktivasyonda farklı çalışma prensiplerine sahip değirmenler kullanılmaktadır. Aktivasyon sırasında meydana gelen temel gerilim türleri; sıkıştırma, kesme, darbe, ve çarpışmadır. Değirmenlerde oluşan temel gerilim tipleri Şekil 2.25'te gösterilmiştir (Ercenk, 2008).



Şekil 2.25: Değirmenlerde oluşan temel gerilim türleri, R1-sıkıştırma, R2-kesme, R3-çarpma, R4-çarpışma. (Aydoğmuş, 2019; Ercenk, 2008)

Mekanik aktivasyon için geleneksel değirmenler elverişli olmadığından bu işlem için enerji verimi yüksek olan, gezegensel değirmen, ekstrasentrik titreşimli değirmen ve karıştırılmalı ortam değirmenleri kullanılmaktadır. Endüstride kullanım alanı bulan değirmenler Şekil 2.26'da gösterilmiştir (Uysal, 2018).



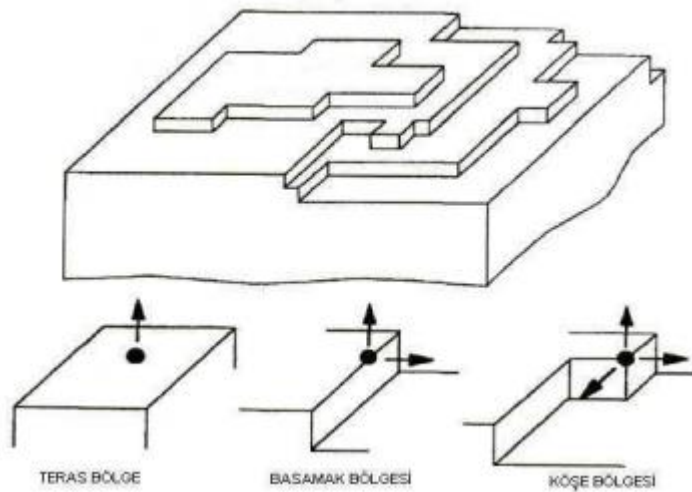
Şekil 2.26: Mekanik aktivasyon amacı ile kullanılan değirmenler (a) Döner tamburlu değirmen, (b) Gezegensel değirmen, (c) Titreşimli değirmen, (d) Karıştırılmalı değirmen, (e) Milli değirmen. (Uysal, 2018)

Mekanik aktivasyon işleminin verimini etkileyen değirmen parametreleri; değirmen türü, değirmen hızı, öğütme süresi, ağırlık bilya-katı oranı, yağ veya kuru öğütme, öğütme atmosferi, değirmen ve bilyaların imal edildiği malzeme, bilya türleri ve boyutça bilya-katı oranıdır (Balaz, 2000; Demirel, 2011).

2.3.2. Mekanik aktivasyonun minerallerin çözünmesine etkileri

Mekanik aktivasyon neticesinde minerallerin çözünmesindeki artışın sebepleri; yapısal düzensizlik, minerallerin amorflaşması, tercihli çözünmeye uygun kristallenmelerin meydana gelmesi, minerallerin yüzey oksidasyonuna uğramasıdır (Tromans ve Meech, 1999; Yıldız ve Alp, 2005).

Ayrıca mineral yüzeyleri atomik açıdan pürüzsüz değildir ve fazla miktarda mikrotopoğrafik düzensizlik içerirler. Mineralin yüzey yapısında kademeler, kristal teraslar ve düzensiz köşeler bulunmaktadır. Mekanik aktivasyon neticesinde tanelerin kırılması ve parçalanması sağlanarak değişik boyut ve şekillerde kademeler ve teraslar ve köşeler oluşmakta ve mineralin çözünme verimi artış göstermektedir (Yıldız ve Alp, 2005). Minerallerin teras, basamak ve köşe yapısı Şekil 2.27’de gösterilmiştir (Tromans ve Meech, 1999).



Şekil 2.27: Minerallerin teras, basamak ve köşe bölgeleri. (Tromans & Meech, 1999)

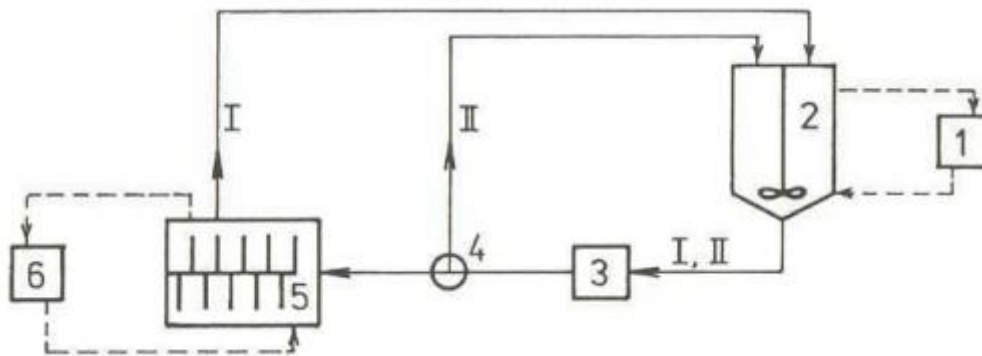
Yüzey mikrotopoğrafyası minerallerin çözünmesinde önemli rol oynamaktadır. Tepkime hızı basamak uçlarında teras bölgelerine göre daha yüksektir. Bu durum parçacıklarda depolanan enerji ve amorf-polimorf dönüşümlerin meydana gelmesi ile açıklanmaktadır (Tromans ve Meech, 1999; Yıldız ve Alp, 2005).

2.3.3. Endüstride kullanılan mekanik aktivasyon prosesleri

Minerallerin çözünmesi hususunda birçok avantaja sahip olan (reaksiyon sıcaklıklarının düşürülmesi, çözünürlük miktarı ve hızının artırılması, daha kısa reaksiyon süreleri vb.) mekanik aktivasyon, bu avantajları nedeniyle endüstride kullanılmaktadır (Demirel , 2011).

2.3.3.1. Melt prosesi

Tetrahedrit ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), minerali bakır ve antimon açısından önemli bir kaynaktır. Gümüş ve civa içermesi nedeniyle de özel bir yere sahiptir. Krompachy'de (Slovakya) pirometalurjik yöntemlerle bakır üretimi için kalkopirit konsantresi, atık bakır ve tetrahedrit kullanılmaktadır. Tetrahedrit konsantresi flotasyon ile zenginleştirildikten sonra %27 bakır, %16 antimon ve 4000 g/ton gümüş tenörüne sahip olmaktadır. Ancak Krompachy'deki tesiste işlenecek konsantrede antimon miktarının %1'i aşması istenmemektedir. Antimon tenörünü düşürmek amacıyla tesiste uçucu kavurma, klorlayıcı kavurma gibi pirometalurjik işlemler uygulanmışsa da antimon miktarı istenen seviye indirilememiştir. Bu nedenle 1992 yılında mekanik aktivasyon kullanılan yeni bir prosese (Melt-Mechanochemical Leaching of Tetrahedrite) geçilmiştir. Gerçekleştirilen mekanik aktivasyon işlemleri sonrası %15,93 olan antimon tenörü %0.25'e düşürülmüştür. Melt-Mechanochemical Leaching of Tetrahedrite prosesi akım şeması Şekil 2.28'de verilmiştir (Balaz, 2000).



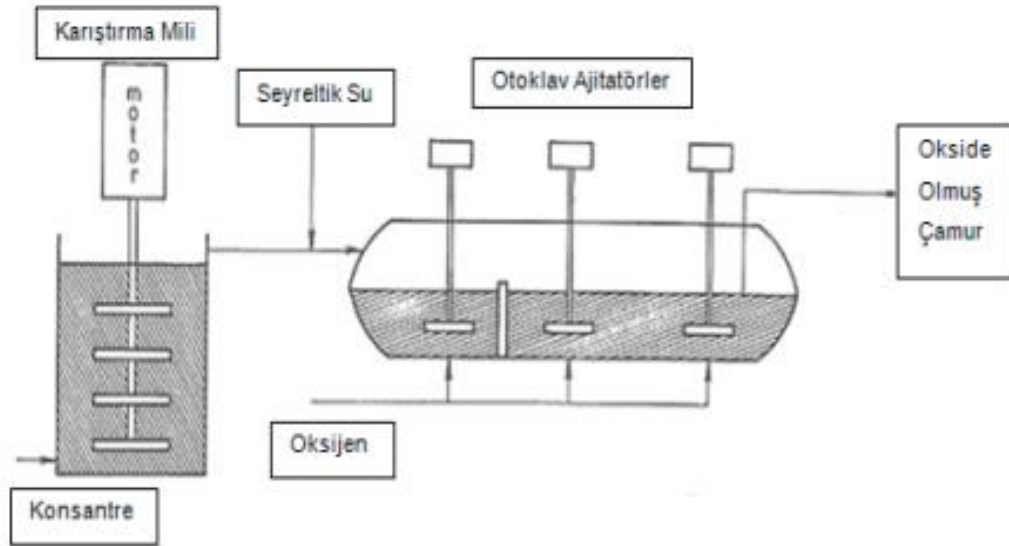
Şekil 2.28: Proses akım şeması. 1-ısıtma, 2-kimyasal reaktör, 3-pompa, 4-valf, 5-atritör, 6-soğutma. (Çalışma rejimleri: I: mekanokimyasal liç, II: kimyasal liç) (Balaz, 2000)

2.3.3.2. Metprotech prosesi

Bir çok altın yatağı çok ince öğütmeye karşı dirençlidir. Bu proseste altının siyanürle çözündürülmesi işlemi değirmen içerisinde yapılarak altın kazanımının bir kısmının değirmende gerçekleşmesi ve maliyetlerin düşürülmesi sağlanmaktadır. Prosesin endüstride ilk kullanımı 1988 yılında yapılmıştır ve 1988-1998 yılları arasında Güney Afrika, Avustralya ve Yeni Zelanda’da hizmete alınmıştır (Göktaş, 2018).

2.3.3.3. Activox prosesi

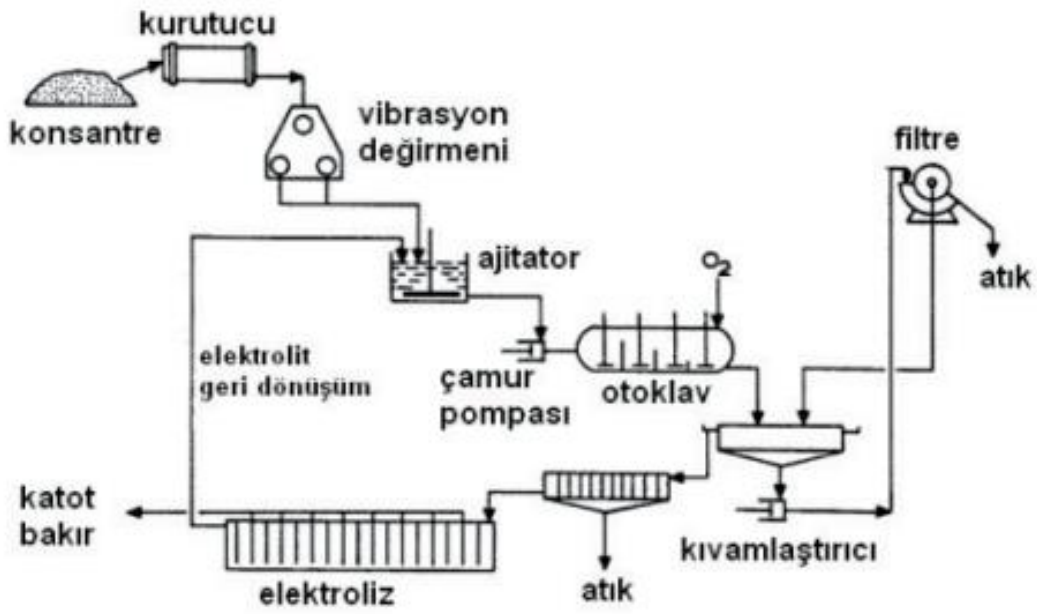
Bu proses, temelde ultra-ince öğütme ve öğütme altında basınçlı liç işlemlerini içermektedir. Mekanik aktivasyon ilk kademede gerçekleşir ve burada ultra ince öğütülmüş ve seyreltilmiş çamur basınçlı liç işleminin gerçekleşeceği otoklavlara geçer. Activox prosesi şematik görünümü Şekil 2.29’da verilmiştir (Corrans ve diğ, 1995).



Şekil 2.29: Activox prosesi şematik görünümü. (Corrans ve diğ, 1995)

2.3.3.4. Lurgi-Mitterberg prosesi

Bu proste bakır eldesinde, mekanik aktivasyon kullanılarak kalkopiritin (CuFeS_2) liç verimi arttırılmıştır. Bu şekilde kalkopirit konsantresinden %96 verimle bakır kazanımı elde edilmiştir. Yetmişli yıllarda kullanılmış olan bu prosteden yüksek enerji tüketimi ve maliyetler nedeniyle vazgeçilmiştir. (Demirel, 2011). Prosesin akım şeması Şekil 2.30'da verilmiştir (Biangardi ve Pietsch, 1976).



Şekil 2.30: Lurgi-Mitterberg prosesi akım şeması. (Biangardi ve Pietsch, 1976)

2.3.3.5. Irıgetment prosesi

Sovyetler Birliği'nde altın içerikli sülfür minerallerinin siyanür liç yöntemiyle üretiminde mekanik aktivasyonun olumlu etkilerinin olduğunun belirlenmesi üzerine yoğun çalışmalar yapılmış ve neticesinde Irıgetment prosesinde bu çalışmalar denenmiştir. Mekanik aktivasyonla birlikte liç süresi kısalmış, altın kazanımı yaklaşık %11 artmış ve NaCN tüketimi ise değişmemiştir (Göktaş, 2018).

2.3.3.6. Sunshine prosesi

1984 yılında, Sunshine Mining & Refining Company adlı firma, antimon, bakır ve gümüş içeren sülfür kompleksi cevherlerinin hidrometalurjik işlemine yeni bir yaklaşım getirdi. Bu çalışma, sülfürik asit ve oksijenle basınç liçi işlemlerini içermektedir. Bu işlem, tetrahedritin alkali liçinden sonra katı atıklardan gümüş ve bakırın geri kazanılmasına olanak sağlar (Yarkadaş, 2010).

2.3.4. Literatürde yapılan bazı çalışmalar

Mekanik aktivasyon hidrometalurjik veya pirometalurjik süreçlerin içerisinde özellikle malzemenin reaksiyona girme yeteneğini arttırarak daha sonra yapılacak olan liç işlemlerinin verimine olumlu etkiler yapmaktadır. Bu nedenle birçok bilim insanı tarafından farklı prosesler içerisinde mekanik aktivasyon üzerine birçok çalışma yapılmıştır.

Mekanik aktivasyonun jipsin ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ısı davranışına etkisinin incelendiği bir çalışmada, jips örnekleri mekanik aktifleştirme amacıyla tungsten karbür havan ve bilyalar kullanılarak aşırı öğütülmüş ve aşırı öğütmenin jipsten alçı üretmek amacıyla yapılan kalsinasyon işlemine etkileri incelenmiştir. Sonuçta mekanik aktivasyonun kalsinasyon dönüşüm sıcaklıklarında düşüş sağladığı görülmüştür (Şener ve Erdemoğlu, 2014).

Karbonatlı mangan cevherinin sülfürik asit liçine mekanik aktivasyonun etkileri incelenmiştir. Cevher gezegensel değirmende aşırı öğütülerek aktive edilmiş ve amorflaşma miktarı XRD analizleriyle belirlenmiştir. Sonuçta mekanik aktivasyonla birlikte cevher yapısında amorflaşma ve düzensizlik tespit edilmiştir. Bu sayede cevherin asit liçindeki çözünürlüğünde artış meydana gelmiştir (Yıldız, 2010).

Boksitten alümina üretimi sırasında açığa çıkan kırmızı çamurdan değerli metallerin geri kazanılması amacıyla yapılan çalışmada, kırmızı çamur yüksek enerjili bir değirmende aşırı öğütülerek aktive edilmiş ve ardından HCl liçine tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda artan mekanik aktivasyon süresiyle birlikte liç veriminin ve değerli metal ekstraksiyonun da arttığı görülmüştür (Turan, 2021).

Malahit cevherinin amonyum nitrat ile liç işlemine mekanik aktivasyonun etkilerinin incelendiği çalışmada, malahit cevheri liç öncesi farklı sürelerde aşırı öğütülerek mekanik

olarak aktive edilmiştir. İşlem görmemiş cevherle mekanik olarak aktive edilmiş cevherin liç verimleri karşılaştırılmış ve mekanik aktivasyon süresinin artışıyla liç veriminin de arttığı görülmüştür. Ancak mekanik aktivasyon süresinin aşırı uzun tutulduğu durumlarda ise ince cevherin topaklandığı ve bu durumun liç verimine olumsuz etki ettiği gözlenmiştir (Akçay ve Apaydın, 2017).

Çayeli sülfürlü bakır konsantresi üzerinde artan mekanik aktivasyon süresinin ve katı-bilya oranının etkilerinin incelendiği çalışmada, optimum mekanik aktivasyon süresi 2 saat, bilya/katı oranı ise 30 olarak tespit edilmiştir. Bu değerlerin üzerine çıkıldığında mekanik aktivasyonun cevher üzerinde olumsuz etkiler yaptığı gözlenmiştir. Mekanik aktivasyon süresinin artışı tanelerin aglomerasyona uğramasına, bilya sayısının artışı ise çarpışma mesafesini düşürerek amorflaşma miktarında azalmaya yol açmıştır (Demirel ve diğ, 2017).

İnce öğütme ile mekanik aktivasyon arasındaki ilişkilerin araştırıldığı bir çalışma yapılmıştır. Mekanik enerji gevşemesi, kırılma fiziği açısından ele alınır. Öğütme sınırının sert-kırılgan geçiş boyutuna eşit olduğu gösterilmiştir. Parçacıkların boyutunun bu boyutun ötesinde azaltılmasına, gevşeme mekanizmasındaki gevrek kırılmadan sert akışa kadar değişiklikler eşlik eder. Bu değişiklik, yapı bozulmalarında önemli bir büyümeye yol açar ve derin bir mekanik aktivasyon aşamasıyla tanımlanabilir. Bir öğütme cihazında mekanik işlemeyi karakterize etmek için, darbelerin stresle dağılımı tanıtılmıştır. (Boldyrev ve diğ, 1996).

Kimya alanında mekanosentez gelişmelerinin incelendiği bir çalışmada, mekanik aktivasyon yoluyla orijinal özelliklere sahip her tür nanomateryalin sentezlenebileceği ve geliştirilmiş özelliklere sahip konsolide malzemelerin hazırlanmasına doğru bir adım olacağı öne sürülmüştür (Gaffet, 1999).

Talk-kaolen-alümina karışımı seramik sistemde kordiyerit oluşumuna mekanik aktivasyonun etkilerinin incelendiği çalışmada, karışım gezegensel değirmende 1 saat mekanik olarak aktive edilmiş ve kordiyerit faz dönüşümleri incelenmiştir. Sonuçta mekanik aktivasyonla birlikte kordiyerit faz dönüşümü sıcaklığında düşüş sağlanmıştır (Yürüyen ve diğ, 2014).

2.4. Alümina Özellikleri ve Kullanım Alanları

Alümina, Al_2O_3 formülü ile gösterilir ve alüminyumun en değerli oksididir. Alüminyum yer kabuğunun yaklaşık olarak %8'ini oluşturmaktadır (Apaydın, 2018; Demir, 2017). Bununla birlikte alümina ise yer kabuğunda yaklaşık %16 oranında bulunmaktadır (Demir, 2017). Ayrıca alüminyum doğada genel olarak alümina silikat yapılı şekilde bulunmaktadır (Apaydın, 2018).

Alümina, oksit formunda bulunan seramik bir malzemedir. Tabiatta kararlı halde bulunan alümina korund olarak adlandırılmaktadır. Korundun bazı safsızlıklar içeren haline ise “zımpara taşı” adı verilmektedir. Saf alümina doğada farklı kristal yapılarda bulunabilmekte ancak tüm bu kristal yapılar 750-1200 °C sıcaklıklarında korunda dönüşebilmektedir ve dönüşüm tersinir değildir. Bu dönüşümü etkileyen faktörler ise zaman, kristal boyutu ve atmosfer şartlarıdır (Terzier, 2011).

Alüminanın ticari olarak kullanımı ilk olarak 1907 yılında yüksek alümina seramik üretimi konusunda alınan bir patentle başlamıştır. Daha yaygın üretimi ve kullanımı ise 1920 ile 1930 yılları arasında gerçekleşmiştir (Şahin, 2006).

Alüminanın ilk kullanım alanları ise buji ve laboratuvar malzemeleri alanında gerçekleşmiştir. Günümüzde ise daha yaygın kullanım alanına sahip olmuştur. Özellikle kesici takım, yatak malzemesi, tekstil sektörü, elektronik sektörü, zırh yapımı ve implant yapımı alanlarında kullanılmaktadır (Şahin, 2006). Geçiş alüminaları ise yüzey özellikleri sayesinde katalizör, adsorbent ve ayırma teknolojilerinde önemli ölçüde kullanılmaktadır (Demir, 2017).

Ayrıca alümina yüksek mekanik dayanıma, erime sıcaklığına, elektriğe ve ısıya karşı dirence ve kimyasal dayanıklılığa sahip bir malzemedir ve bu nedenle geniş kullanım alanına sahiptir (Demir, 2017).

2.5. Alümina Türleri

2.5.1. Bayer hidratı, metalurjik ve feedstock alüminalar

Bayer hidrat, daima gipsit formunda bulunmaktadır. En önemli boksit mineralleri, gipsit, böhmit ve diasporittir (Madona, 1999).

Bayer hidratı, ısıtılma işleminden geçirilerek alümina üretilmesi sağlanmaktadır. Alümina üretimi hali hazırda hidrat alümina esasına dayanmaktadır ve hidrat alümina miktarı dünyada 50 milyon tondur. Bu miktarın yaklaşık 45 milyon tonu metalik alüminyum üretiminde kullanılan ve metalurjik veya ergitme kalitede alümina olarak isimlendirilen kalsine alümina üretiminde, geri kalanı ise metalurjik olmayan veya kimyasal amaçlar için kullanılan kalsine alüminalardır. (Hart, 1990).

Alümina hidrat ısıtılıp hidroksil iyonlarını kaybetmesini sağlanarak önce geçiş alümina formlarına ve sonunda da kararlı bir yapıya dönüştürülmektedir. Yapılan bu işleme kalsinasyon, işlem sonucunda üretilen ürüne ise kalsine alümina adı verilmektedir. Kararlı yapıya tamamen dönüşüm 1200 °C civarlarında gerçekleşmektedir (Hart, 1990).

Metalurjik alümina akışkan yataklı kalsinatörlerde üretilmektedir. Bu kalsinatörler 3000 ton/gün kapasiteye sahip, hareketsiz ve yüksek enerji verimine sahip kalsinatörlerdir. Bu kalsinatörlerde üretilen alüminanın BET spesifik yüzey alanı 50-80 m²/g arasındadır (Terzier, 2011).

Metalurjik alanların dışında kullanılmak için üretilen kalsine alüminalar ise döner fırınlarda üretilmektedir. Bu alüminalar florür, borat, klorür ve floraboratlar gibi kimyasalların katkısı olmaktadır. Bu kimyasallar mineralizer olarak adlandırılır. Üretim prosesinden kaynaklı olarak %0,5 oranında Na₂O içermektedir. Na₂O içeriği su veya asit liçi prosesleriyle, silika taneleriyle sodanın fiziksel ayrılması ve reaksiyonu ile azaltılabilir (Terzier, 2011).

2.5.2. Tabular alümina

Tabular alümina, düşük porozite oranına sahip aşırı derecede saf malzemelerdir. Tabular alümina, 2 cm çapına sahip bayer alümina peletlerinin 1925 °C üstü bir sıcaklığa ısıtılmasıyla üretilmektedir. Tabular alümina kristalleri sert ve yüksek ısı iletkenliğe sahip malzemelerdir. Ayrıca yüksek yoğunluklu ve yüksek basınç dayanımına sahiptirler. Kırma ve öğütme işlemleri ile geniş tane boyu aralığına sahip (25µm-6mm) tabular alümina üretilmektedir (Dombaycı, 2007).

Tabular alüminalar bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerinden ötürü refrakter sektörü açısından önemli bir malzemedir. Bu özellikler:

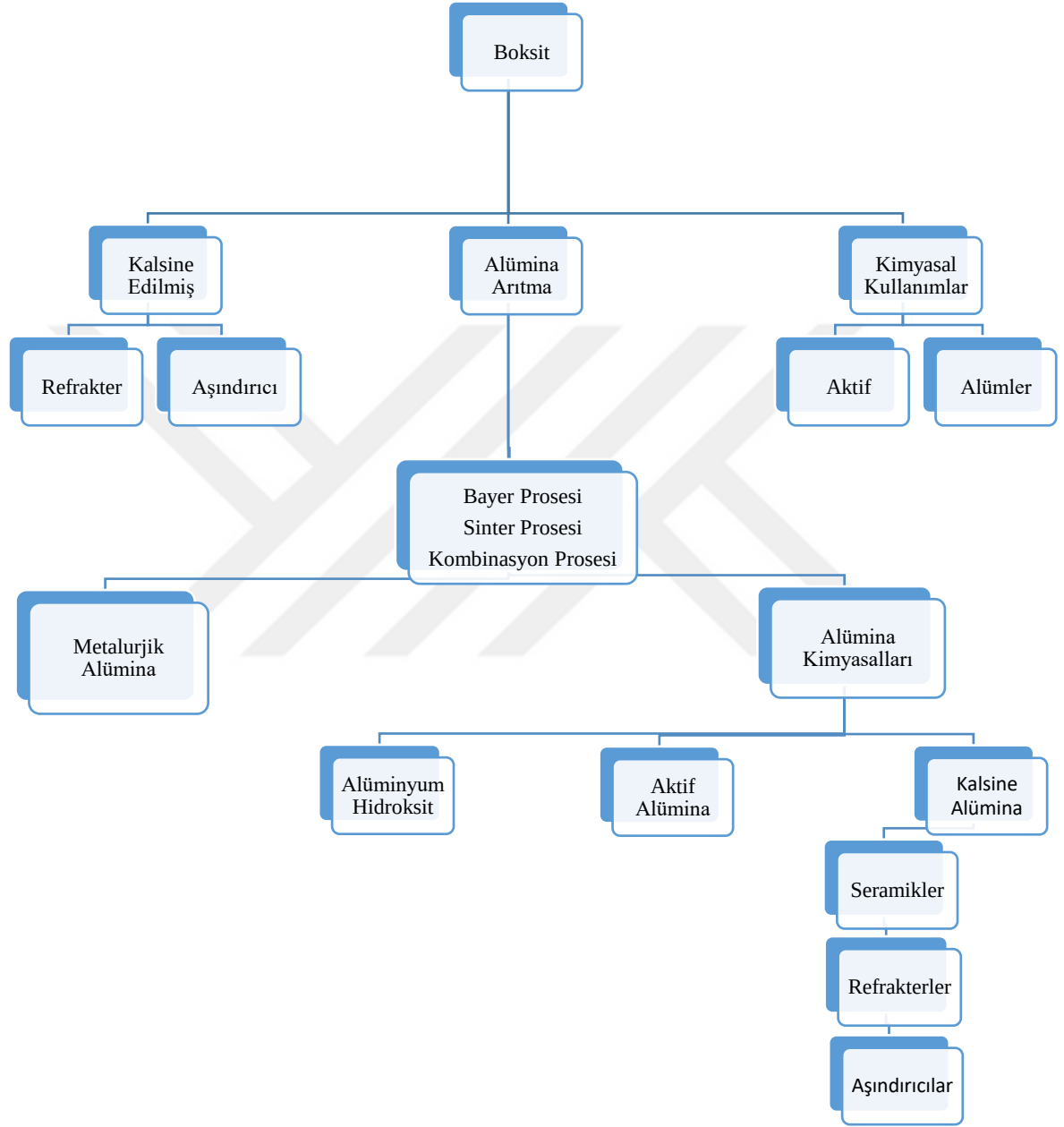
- %99,5'in üzerinde saflıkta tabular alümina üretilir.
- Mohs sertliği 9'dur.
- Görünür gözenekliliği düşüktür.
- Yaklaşık 2050 °C'ye kadar varan yüksek bir ergime sıcaklığına sahiptir.
- Birçok asit ve baza karşı kimyasal dirence sahiptirler.
- Seramik malzemelere göre daha yüksek ısı iletkenliğine sahiptir.
- Elektrik direnci yüksektir.
- Hacim kararlılığı mükemmeldir.
- Yüksek tane mukavemetine sahiptirler.
- Aşınma direnci yüksektir.

Tabular alüminalar, yüksek fırın astarlarında, demir çelik sektöründe, sürekli döküm hatlarında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır (Dombaycı, 2007).

2.5.3. Özel kalsine alüminalar

Alümina kimyasallar üç gruba ayrılmaktadır. Bu gruplar alüminyum hidroksit, kalsine alümina ve aktif alüminadır. Alüminyum hidroksit, bayer prosesiyle elde edilmektedir. Alüminyum hidroksitin 1000 °C'nin altındaki ısı ışımları sonucu aktive edilmesiyle üretilmektedir. Kalsine alüminalar ise soda içeriklerine ve empüritelerine bağlı olarak üç gruba ayrılmaktadır. Normal sodalı ve düşük sodalı kalsine alüminalar bayer prosesiyle üretilmektedir. Yüksek saflıktaki alüminalar ise alüminyum tuzlarının

parçalanmasıyla üretilmektedirler. Kalsinasyon işlemi döner fırınlarda yapılmaktadır (Saridede & Birol, 2005). Boksitten elde edilen alüminalar Şekil 2.31’de verilmektedir (Hart, 1990).



Şekil 2.31: Başlıca alümina ürünleri. (Terzier, 2011)

Boksitten elde edilen alüminanın %93'ü alüminyum metali üretiminde kullanılmaktadır. Kalan %7'lik kısım ise aşındırıcı refrakter ve kimyasal madde endüstrilerinde kullanılmaktadır. Özel alüminaların bazı kullanım alanları Çizelge 2.9'da verilmiştir (Saridede ve Birol, 2005).

Çizelge 2.9: Özel alüminaların kullanım alanları. (Saridede ve Birol, 2005)

Ürün Adı	Kullanım Yerleri
Alüminyum Hidroksit	Plastikve Lastiklerde Yanma Önleyici Kağıt Dolgu Malzemesi Diş Macunu Dolgu Malzemesi Antiasit
Düşük Soda lı Kalsine Alümina	İnce Porselen, Beyaz Eşya, Porselen İzolatörler, Buji, Fırın İçi Donanımlar
Normal Soda lı Kalsine Alümina	Sırlama, Emaye Yapımı, Aşındırıcılar, Refrakterler
Yüksek Saflıkta Alümina	Suni Elmaslar Taşıyıcılar, Mikroçip, Katalizörler, Şeffaf Alümina Yan Ürünleri, Kesici Tak Tak Parlat"

Bayerit üretimi için geliştirilmiş olan en önemli yöntemler;

- Sodyum alüminat çözeltisi içerisinde karbondioksit geçirilmesi,
- Alüminyum veya alüminyum alkoolatların su ile tepkimeye sokulması,
- β -alüminanın sudaki dehidratasyonu olarak gösterilebilir.

Bayeritin kristal büyüklüğü yaklaşık 1 μm civarındadır ancak buna rağmen bayerit taneleri 30-100 μm 'lik kümeler halinde bulunmaktadır (Hart, 1990).

Böhmite üretimi için geliştirilmiş en önemli yöntemler;

- Gibsite, bayerit veya amorfik hidroksitin hidrotermal dehidratasyonu,
- Metalik alüminyumun 100 $^{\circ}\text{C}$ 'de buharla muamelesi,
- Gibsite 300 $^{\circ}\text{C}$ 'de hava vasıtasıyla ısıtılması gibi yöntemlerdir (Değerli, 2002).

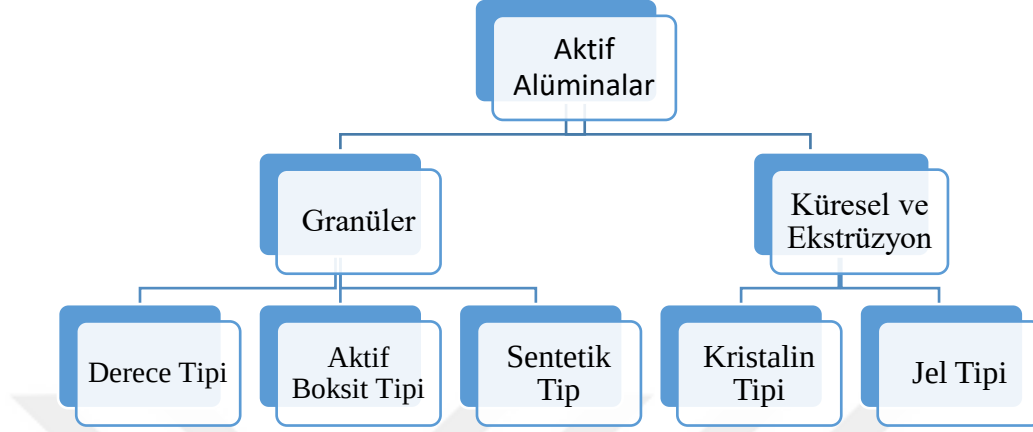
2.5.3.3. Aktif alüminalar

Aktif alümina, alüminyum hidroksitlerin 250-1150 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarda termal dehidroksilasyonları sonucu oluşmaktadır (Hart, 1990).

Aktif alüminalar, büyük yüzey alanı, gözenek yapısı ve özel yüzey kimyası nedeniyle adsorpsiyon ve kataliz işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum hidroksitlerin ısıtılma süreciyle bünyesindeki suyun büyük kısmı alınarak aktif alümina meydana getirilmektedir. Alüminyum hidroksit kristalleri belirli sıcaklık ve basınç değerlerinde kristal alüminyum hidroksitlere dönüşmekte ve bu hidroksitler geçiş alüminası olarak adlandırılmaktadır. Sıcaklığın sürekli olarak artırılması sonucunda farklı yapıda kristal fazlar oluşmakta ve son durumda α -alümina oluşmaktadır (Değerli, 2002).

Alüminyum hidroksitlerin ısı işleme tabi tutulması ile oluşan yapılar genel olarak alümina olmakta ve 1000 $^{\circ}\text{C}$ 'nin altındakilere aktif alümina adı verilmektedir. 1150 $^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerinde sıcaklıklarda kalsine edilerek üretilen alüminaya ise α -alümina adı verilmektedir. Bu iki sıcaklık arasında meydana gelen alümina ise β -alümina olarak adlandırılmaktadır. Kalsine edilmiş α -alümina çeşitli işlemlere tabi tutularak tabular alümina ve fused alümina meydana getirilebilmektedir (Terzier, 2011).

Üretim şekilleri, tane boyutları ve özgül yüzey alanlarına göre çeşitli aktif alümina türleri bulunmaktadır. Aktif alümina türleri Şekil 2.32’de verilmiştir (Terzier, 2011).



Şekil 2.32: Aktif alümina türleri. (Terzier, 2011)

Derece tipi aktif alüminalar, Bayer α -trihidrattan üretilmektedir. Bayer prosesi ile alümina üretildiği esnada çökeltme banyolarının çeperlerinde 1,5 m kalınlığa ulaşabilen gipsit tabakası birikmektedir. Bu tabaka önce kırılarak yıkanır ve aktive edilir ve istenen boyutlara ulaşıncaya kadar eleme işlemine tabi tutulur. Aktifleştirme işlemi 400 °C’de hava veya diğer gazlar vasıtasıyla yapılmaktadır (Yüzer ve diğ, 1995).

Aktif boksitler, içeriğinde gipsit formunda alümina ihtiva eden boksitlerin termal aktivasyonu yoluyla üretilmektedir. Bu boksitlerin alümina dışındaki içeriği, en yüksek kaliteli üründe % 10 en düşük kaliteli üründe % 25-30 civarındadır. 175 ile 240 m²/g özgül yüzey alanına sahip ve ticari ürünün tane boyutları 6,4 mm ile 0,177 mm arasındadır (Hart, 1990).

Sentetik tip alüminalar, merdaneli kalıpta gipsitin mekanik preslenmesi yoluyla granüler ürünler halinde üretilmektedir. Kalıptan çıkarılan ürün kırma ve eleme işlemlerine tabi tutulmakta ve daha sonra döner kalsinasyon fırınlarında 400 ile 600 °C sıcaklıklarda aktifleştirilmektedir. Üretilen ürün 150 ile 240 m²/g özgül yüzey alanına ve 0,35 cm³/g toplam gözenek hacmine sahiptir. Bu değerlerin düşük olma sebebi malzemenin yüksek yoğunluğuna bağlı olmaktadır (Terzier, 2011).

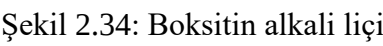
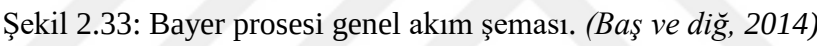
Kristalin tipi alüminalar gipsitin 400-800 °C arası sıcaklıklarda aktifleştirilmesi sonucu elde edilmektedir. Ürün amorf alümina formundadır. Çeşitli boyutlarda küreler meydana getirmek amacıyla ürün önce suyla topaklaştırılıp ardından alüminanın tekrar hidratlaştırılmaktadır. Alümina tekrar hidratlandığında istenen porozite hacmine ve tane sertliğine ulaşılmaktadır. Ürün son olarak 400 °C sıcaklıkta gazlarla muamele edilerek yeniden aktifleştirilmektedir. Üretilen nihai ürün 250 ile 1200 °C arası sıcaklıklarda ağırlıkça % 2 ile 6 arasında kızdırma kaybı göstermekte ve özgül yüzey alanı 250-375 m²/g arasında olmaktadır (Değerli, 2002).

2.6. Alümina Üretimi

2.6.1. Bayer prosesi

Günümüzde, alümina üretimini için Bayer prosesi kullanılmaktadır. Bayer prosesinde hammadde olarak boksit kullanılmaktadır. Bayer prosesi ile üretilen alüminanın da çok büyük bir kısmı da alüminyum üretiminde kullanılmaktadır (Girgin, 1984).

Bayer prosesi, boksitin basınç altında, kaynama noktasının üzerinde bir sıcaklıkta NaOH çözeltisi ile liç işlemine tabi tutulması esasına dayanmaktadır. Liç işlemi sonrası çözünmeyen kısım filtrasyon işlemi ile uzaklaştırıldıktan sonra, çözeltiye alüminyum hidroksit taneleri ilave edilerek alüminyumun saf alüminyum hidroksit kristalleri halinde çöktürülmesi sağlanmaktadır. Oluşan çökelekler filtrasyon, yıkama ve kurutma işlemlerine tabi tutulduktan sonra saf alümina (Al₂O₃) elde etmek amacıyla kalsine edilmektedir. Elde edilen alümina elektrolitik indirgenme hücrelerine beslenmektedir. Şekil 2.33.'te Bayer prosesi genel akım şeması gösterilmiştir (Baş ve diğ, 2014). Şekil 2.34'te Boksitin alkali liçi görülmektedir.



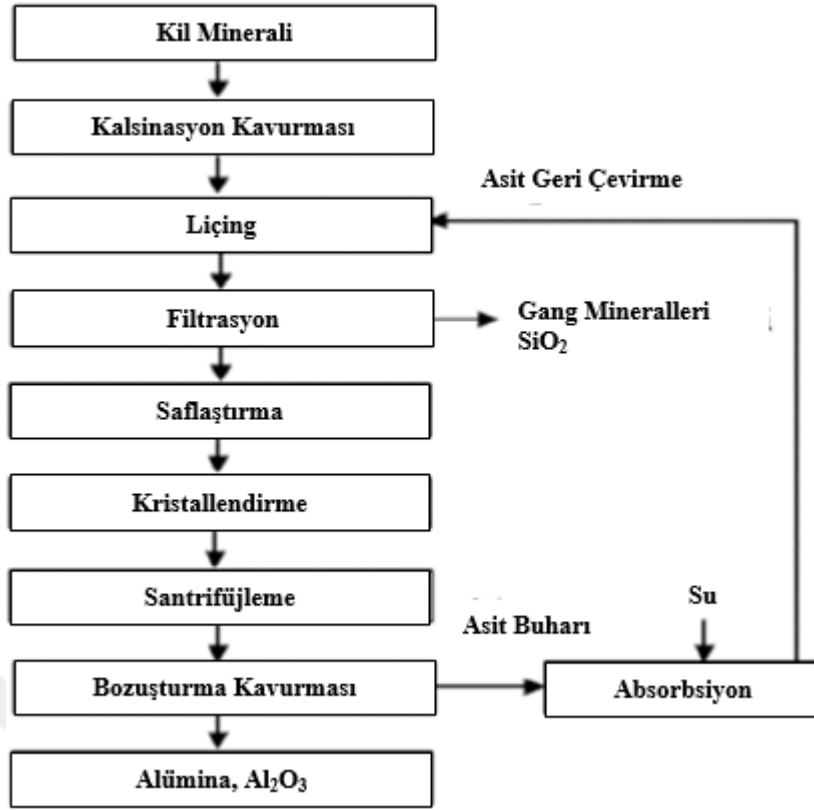
2.7. Boksit Dışı Kaynaklardan Alümina Üretimi

Boksit dışı kaynaklardan alümina üretimi konusu, özellikle alümina üretiminde önde gelen ülkelerin boksit rezervlerindeki azalmalar nedeniyle boksite alternatif arayışlarına başlamaları nedeniyle gündeme gelmiştir. Alümina üretiminde söz sahibi olan ülkelerde alternatif çalışmalardan olumlu sonuçlar alınmıştır. Bazılarında ise her an üretime geçebilecek şekilde hazırlıklar tamamlanmıştır (Girgin, 1984).

Boksite alternatif olarak özellikle killer öne çıkmaktadır. Killerin yanı sıra kömür şeylleri, nefelinli siyenit, kyanit, andalusit, sillimanit ve termik santral artığı uçucu küllerin de boksite alternatif olabileceği düşünülmektedir (Erdemoğlu ve diğ, 2018; Girgin, 1984).

Alternatif olabilecek hammaddelerin özelliklerine bağlı olarak; sülfirik asit, hidroklorik asit gibi asitler kullanılarak asit liçi, kireç veya soda-kireç karışımıyla sinterleme işleminin ardından su veya alkali çözeltisiyle liç ve indirgen ortamda klorlama gibi yöntemler denenmiş ancak bu yöntemlerin çoğunun ekonomik olarak Bayer prosesinin yerini tutamayacağı görülmüştür. Bununla birlikte Bureau of Mines (ABD) ve Aluminum Pechiney (Fransa) tarafından geliştirilen iki ayrı prosesin olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu proseslerden ABD tarafından “Killerden Hidroklorik Asit Prosesiyle Alümina Eldesi”, Fransa tarafından ise kil veya kömür içerikli şeyllerin hammadde olarak kullanıldığı “H⁺ Prosesi” geliştirilmiştir (Girgin, 1984).

Kil minerallerinden alümina üretimi konusunda bilim insanları tarafından genel olarak kabul görmüş olan akım şeması şekil 2.35.’te verilmiştir (Erdemoğlu ve diğ, 2018).



Şekil 2.35: Kil minerallerinden alümina üretimi akım şeması. (Erdemoğlu ve diğ, 2018)

Şekil 2.35 incelendiğinde prosesin dört ana basamak ile uygulandığı görülmektedir. Başlangıçta cevhere genellikle kalsinasyon kavurması yapılarak cevherdeki kil mineralleri aktifleştirilmektedir. Kalsine edilerek aktifleştirilmiş olan cevher asit liçine tabi tutulmaktadır. Liç işlemiyle elde edilen alüminyumlu çözeltiden alüminyum tuzu çöktürülmekte ve elde edilen alüminyum tuzu kavurma işlemine tabi tutularak alüminaya dönüştürülmektedir. Kil minerallerinden liç işlemi ile alümina üretiminde alüminyumun çözünme verimini ve hızını arttırmak için kalsinasyon kavurması (termal aktivasyon) yöntemi kullanılmaktadır. Ancak aşırı öğütme (mekanik aktivasyon) ile de cevher aktifleşebilmektedir. Kil minerallerinin termal aktivasyonu ile alüminyum silikat minerallerinin kristal yapısı bozuşturularak, asit ile tepkimeye daha elverişli yeni bir mineral yapı veya amorf bir yapı meydana gelmesi amaçlanmaktadır (Erdemoğlu ve diğ, 2018).

Kalsinasyon kavurması sırasında silikatlı mineralin yapısında bulunan kristal suyu, buharlaşarak uzaklaşmaktadır (dehidroksilasyon). Böylelikle gözenekli, yüksek özgül yüzey alanına sahip ve amorf bir katı elde edilmektedir. Bu katı aynı zamanda aktifleşmiş olduğundan seyreltik asitlerle çözünebilir hale gelmektedir. Bu durumda aktivasyonu

sağlayan en önemli parametrenin dehidroksilasyon olduğu görülmektedir. Silikatların ısıtılmasının ardından asitlerle liç edilmesi sonucu metal içerikleri çözeltiye geçmekte ve geriye silis (SiO₂) bir mineral iskelet yapı kalmaktadır. Ancak derişik asitlerle liç edildiğinde ise silisin jelleştiğı ve süzme işleminde sorunlara yol açtığı görülmüştür. Ayrıca kavurma sıcaklığının dehidroksilasyon sıcaklığını geçmesi durumunda ise amorflaşmış mineralin yüksek sıcaklık etkisiyle tekrar kristallenerek liç işlemine yanıt veremez duruma geldiğı görülmüştür. Çizelge 2.6.'da kaolinitin kalsinasyon ve liç işlemleri sırasındaki çözünme reaksiyonları görülmektedir (Erdemoğlu ve diğ, 2018).

Çizelge 2.11: Kaolinitin farklı süreçlerdeki reaksiyonları. (Erdemoğlu ve diğ., 2018)

Süreç	Reaksiyonlar
Kalsinasyon Kavurması	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{Kaolinit}) \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2(\text{Metakaolin}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g})$
Asit Liç	$\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2 + 6\text{H}^+_{(\text{sulu})} \rightarrow 2\text{Al}^{3+}_{(\text{sulu})} + 2\text{SiO}_2(\text{kati}) + 3\text{H}_2\text{O}$

Kaolinitin, 400-800 °C sıcaklık aralığında kavrulduğunda, amorf yapılı ve seyreltik asitlerle kolaylıkla tepkimeye girerek alüminyum seçimli olarak sulu çözeltiye geçirebilen metakaoline dönüştüğü görülmektedir. Ancak, 900-1050 °C sıcaklığa ulaşıldığında ise amorf yapılı metakaolin tekrar kristalleşerek asitte çözünmez hale gelmektedir. Ayrıca, kalsinasyon süresi ile alümina kazanım verimi arasındaki ilişki incelendiğinde değışen sıcaklıklarda 30 ve 45 dakika kalsine edilen kaolinitten alümina kazanımının 720 °C'ye kadar arttığı bu sıcaklıktan sonra ise azaldığı görülmüştür. Aynı şekilde Suudi Arabistan'da yapılan çalışmaya göre kaolinitin 400-800 °C sıcaklıklarda kalsine edildikten sonra HCl ile liç edilmesi sonucunda 700 °C kalsinasyon sıcaklığında alümina kazanım verimi %32 iken, 600 °C'de yaklaşık %63 olarak görülmüştür. En yüksek alümina kazanımının 600 °C'de 1 saat kalsine edilmiş kaolinitten elde edildiğı görülmektedir (Erdemoğlu ve diğ, 2018).

2.8. Bozuşturma Kavurması

Asidik liç işlemi sonrası elde edilen metal tuzlarıyla yüklü çözeltinin, buharlaştırma (evaporasyon) yöntemiyle asidik sıvısı uzaklaştırılmakta ve geriye metal tuzu kalmaktadır. Elde edilen metal tuzu bozuşturma kavurmasına tabi tutularak metal tuzlarının, metal

oksitlere bozuşması sağlanmaktadır. Bozuşturma kavurması işlemi asitlere ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemelerden üretilen fırınlarda gerçekleştirilmektedir.

Tez özelinde alümina üretimi üzerinde durulacağından bazı alüminyum tuzlarının literatürdeki bozuşma tepkimeleri Çizelge 2.7.'de verilmiştir.

Çizelge 2.12: Bazı farklı alüminyum tuzlarının bozuşma tepkimeleri.

Tepkimeler	Tepkime Sıcaklığı, °C	Kaynak
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{SO}_3 + 18\text{H}_2\text{O}$	1350 °C	(Çılgı ve Çetişli, 2009)
$2\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{HCl} + 9\text{H}_2\text{O}$	350-1100 °C	(Hartman ve diğ, 2005)
$2\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{HNO}_3 + 15\text{H}_2\text{O}$	250 °C	(El-Shereafy, 1998)

Bozuşturma kavurması ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde, $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ tuzunun 270 °C'ye ulaşan sıcaklıklarda bozuşturma kavurmasına tabi tutulmasıyla Al_2O_3 meydana geldiği ancak hala bir miktar klorürlü ürünün ortamda bulunduğu gözlenmiştir. 350 °C ve 1 saat kalsinasyon sonrası ise alüminanın yaklaşık %9 klorür içerdiği görülmüştür (Çılgı ve Çetişli, 2009).

Düşük sodalı alümina için ise alüminyum klorür hekzahidratın termal bozuşma sıcaklığı 300-900 °C aralığında, kalsinasyon sıcaklığı da 1100-1400 °C aralığında tutulmuş ve bu şartlarda üretilen alüminanın Bayer prosesi ile üretilen alümina ile kıyaslanabilir olduğu sonucuna varılmıştır (Park ve Jeong, 1996).

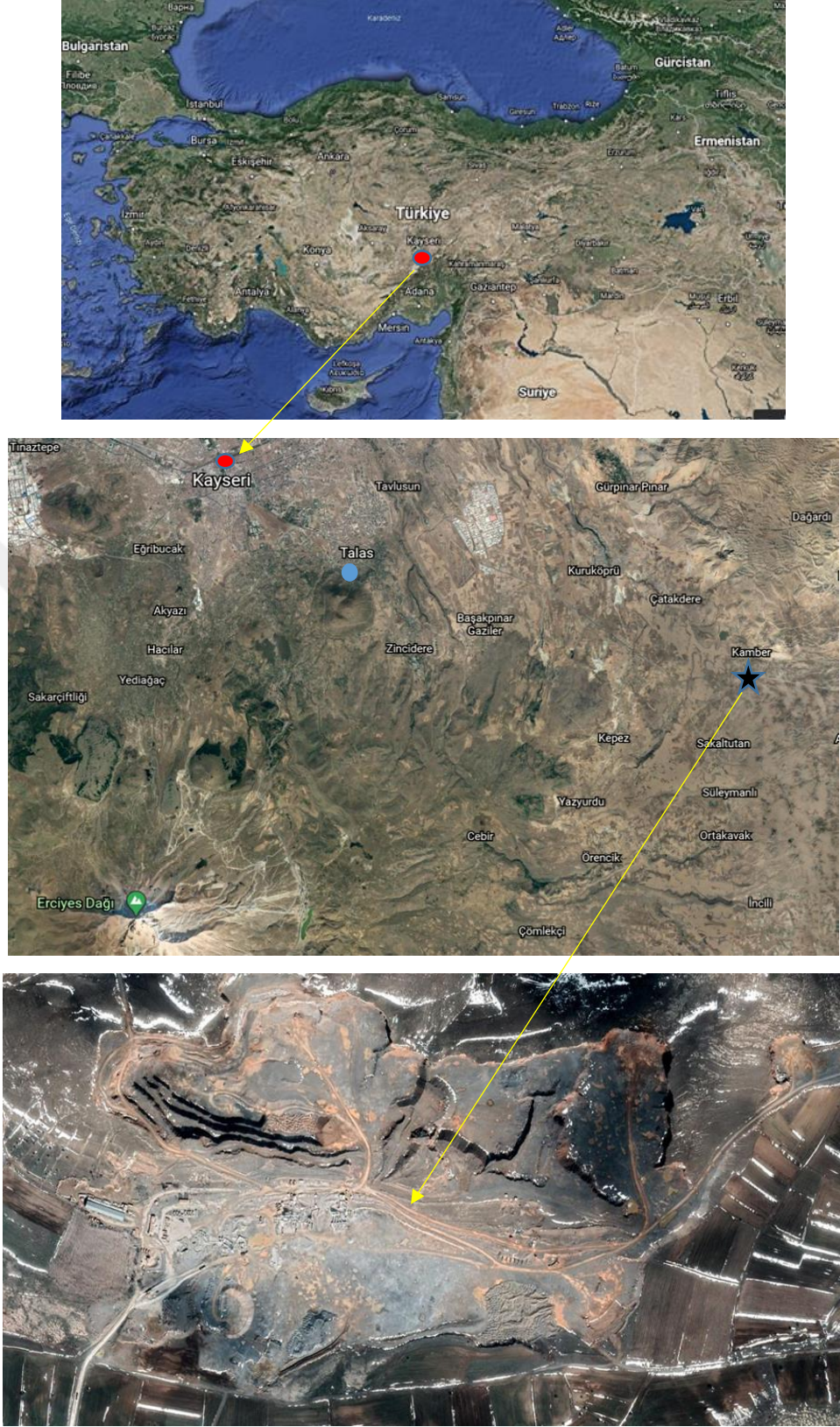
3. MALZEME ve YÖNTEM

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan malzeme, donanım, deneysel yöntemler ve analiz metotları hakkında bilgi verilmiştir.

3.1. Malzeme

Bu çalışmada kullanılan ana malzeme asidik pomzadır. Ülkemiz asidik pomza rezervinin bazik pomzaya oranla oldukça fazla olması nedeniyle asidik pomza tercih edilmiştir. Malzeme, Kayseri ili Talas ilçesi Kamber köyünden temin edilmiştir. Malzeme, Malatya 1. Organize sanayi bölgesinde bims taşı üretimi konusunda faaliyet gösteren Mabimssan Malatya Bims Sanayi aracılığı ile temin edilmiştir. Temin edilen malzemenin tane boyutu parça iriliğinde, miktarı ise 50 kg civarındadır.

Malzemenin temin edildiği bölgenin yer bulduru haritası Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.

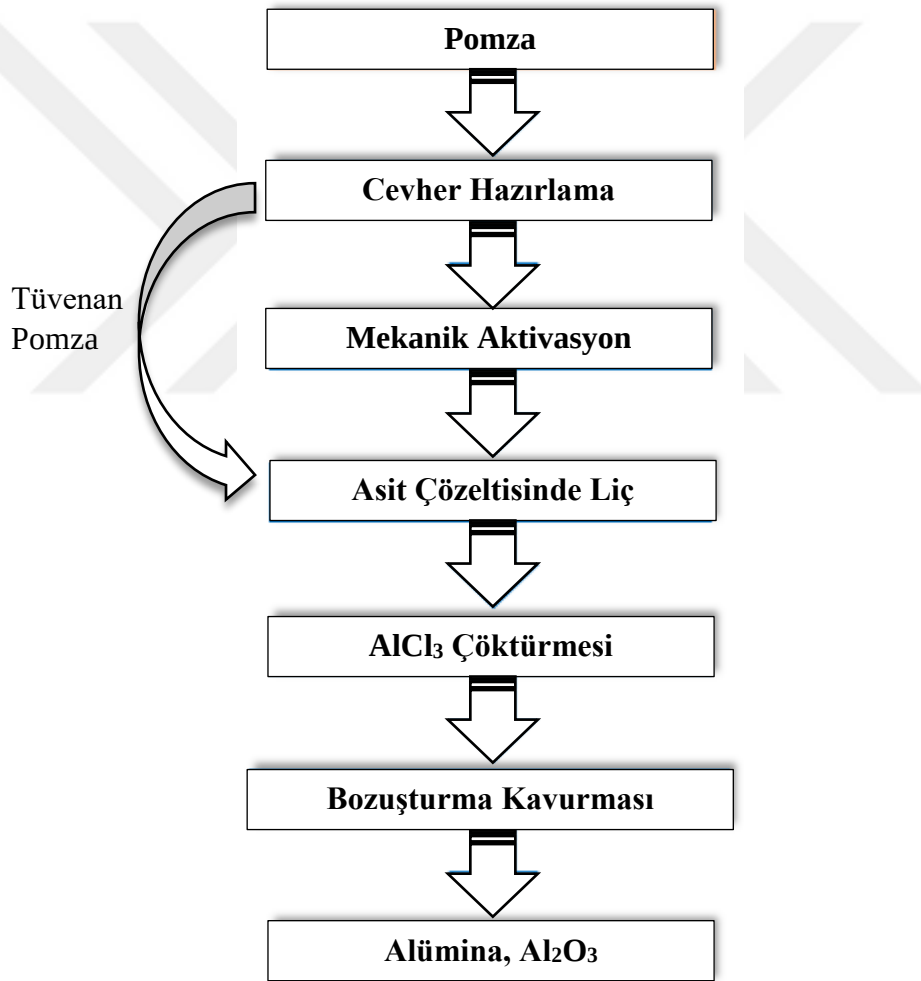


Şekil 3.1: Kayseri-Talas, Kamber Köyü yer bulduru haritası. (●Kayseri, ●Talas, ★Kamber Köyü)

3.2. Yöntem

Tez çalışmasında, pomzadan alümina üretimi amacıyla cevher hazırlama, mekanik aktivasyon için aşırı öğütme, mekanik aktifleştirilmiş cevherin asitte liçi, alüminyum klorür tuzu eldesi için evaporasyon, alümina üretimi amacıyla bozuşturma kavurması işlemleri uygulanmış ve uygulanan işlemler neticesinde elde edilen ürünlerin karakterizasyonu amacıyla çeşitli analiz metotlarıyla analizler yapılarak ürünler tanımlanmıştır.

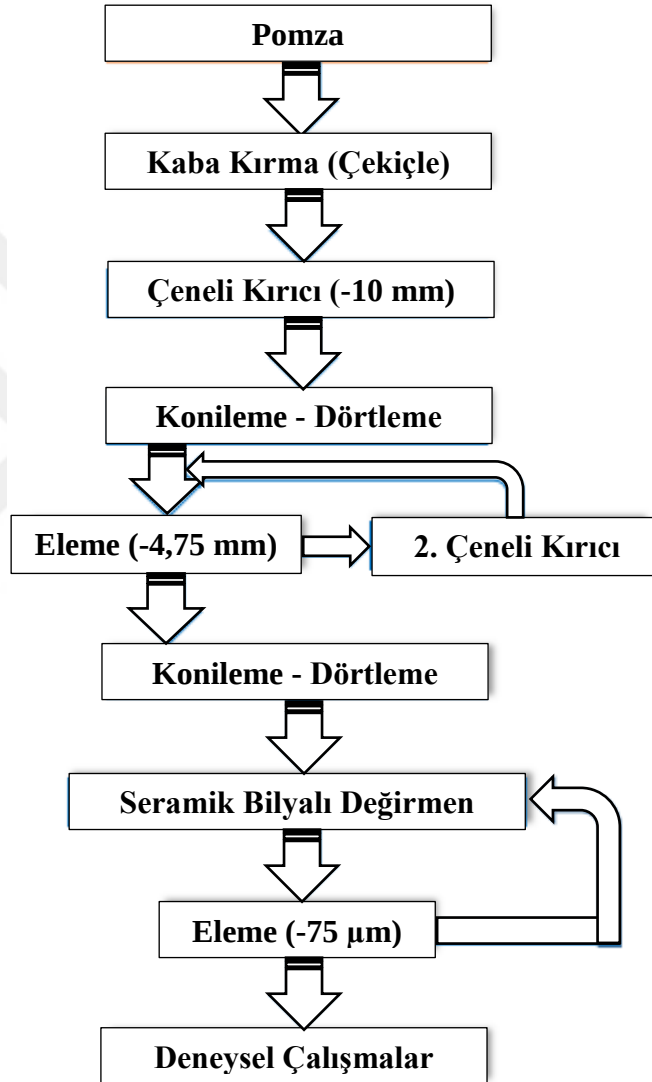
Deneysel yöntemlerin tümünü içeren akım şeması Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Pomzadan alümina üretimi çalışmaları genel akım şeması.

3.2.1. Cevher hazırlama

Pomzanın deneysel çalışmalar öncesi hazırlanması amacıyla kırma, öğütme, eleme ve örnek azaltma işlemleri yapılmıştır. Cevher hazırlama işlemleri Şekil 3.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Pomzanın hazırlanma akım şeması.

3.2.2. Mekanik aktivasyon için aşırı öğütme

Aşırı öğütme işlemi için gezegensel bilyalı değirmen (Fritsch Pulverisette 6 Mono Mill), 250 cm³ iç hacme sahip tungsten karbür (WC) havan ve çapı 10 mm olan WC bilyalar kullanılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: Gezegensel değirmen, öğütme havanı ve bilyaları

Aşırı öğütme; 2, 5, 10, 15, 30, 60 dk öğütme sürelerinde, 10/4 bilya-cevher oranında (B:C) ve 400 devir/dk öğütme hızında, kuru olarak yapılmıştır. Uygulanan aşırı öğütme programı Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1: Aşırı öğütme programı.

Değirmen Hızı, devir/dk	B:C	Öğütme Süresi, dk					
		2	5	10	15	30	60
400	10/4	-	-	-	√	√	√
√ : Daha sonraki deneysel işlemlerde kullanılan örnekler							

Tüm örnekler yüzey neminin uzaklaştırılması amacıyla öğütme öncesi 105 °C’de en az 24 saat etüvde kurutulmuştur. Öğütme sırasında değirmende meydana gelen aşırı ısınmayı engellemek amacıyla öğütme işlemi 15 dk öğütme ve arkasından 15 dk soğutma amacıyla bekletme şeklinde yapılmıştır.

3.2.3. Su ve asit çözeltisinde liç

Tüvenan pomza ve çeşitli sürelerde aşırı öğütülmüş pomza örnekleri, asit derişimi, liç sıcaklığı ve liç süresi her örnekte aynı olacak şekilde seçilerek farklı asitlerde ve suda liç işlemine tabi tutulmuştur. Burada aşırı öğütme süresi ve asit türü değişkenlerinin alüminyum kazanımına etkisi incelenerek alüminyum kazanımının en yüksek olduğu öğütme süresi ve asit türü belirlenmiştir.

Alüminyum kazanımının en yüksek olduğu aşırı öğütme süresi ve asit türünün belirlenmesinden sonra belirlenen öğütme süresi ve asit türünde uygun bir liç süresinin belirlenmesi amacıyla farklı sürelerde liç işlemi gerçekleştirilmiştir. Liç süresi denemeleri sırasında daha önce belirlenen aşırı öğütme süresi ve asit türü parametreleri sabit tutularak bu koşullarda gerçekleştirilen liç süresi denemeleriyle alüminyum kazanımının en yüksek olduğu liç süresi belirlenmiştir. Böylece başlangıçtan bu aşamaya kadar alüminyum kazanımının en yüksek olduğu aşırı öğütme süresi, asit türü ve liç süresi parametreleri belirlenmiştir.

Bir sonraki liç parametresi olan asit derişimi denemeleri için daha önceden belirlenen aşırı öğütme süresi, asit türü ve liç süresi değerleri ile liç çalışmalarının başlangıcında seçilerek sabit tutulan liç sıcaklığı koşullarında, farklı asit derişimlerinde liç işlemleri yapılmıştır. Böylelikle alüminyum kazanımının en yüksek olduğu asit derişimi tespit

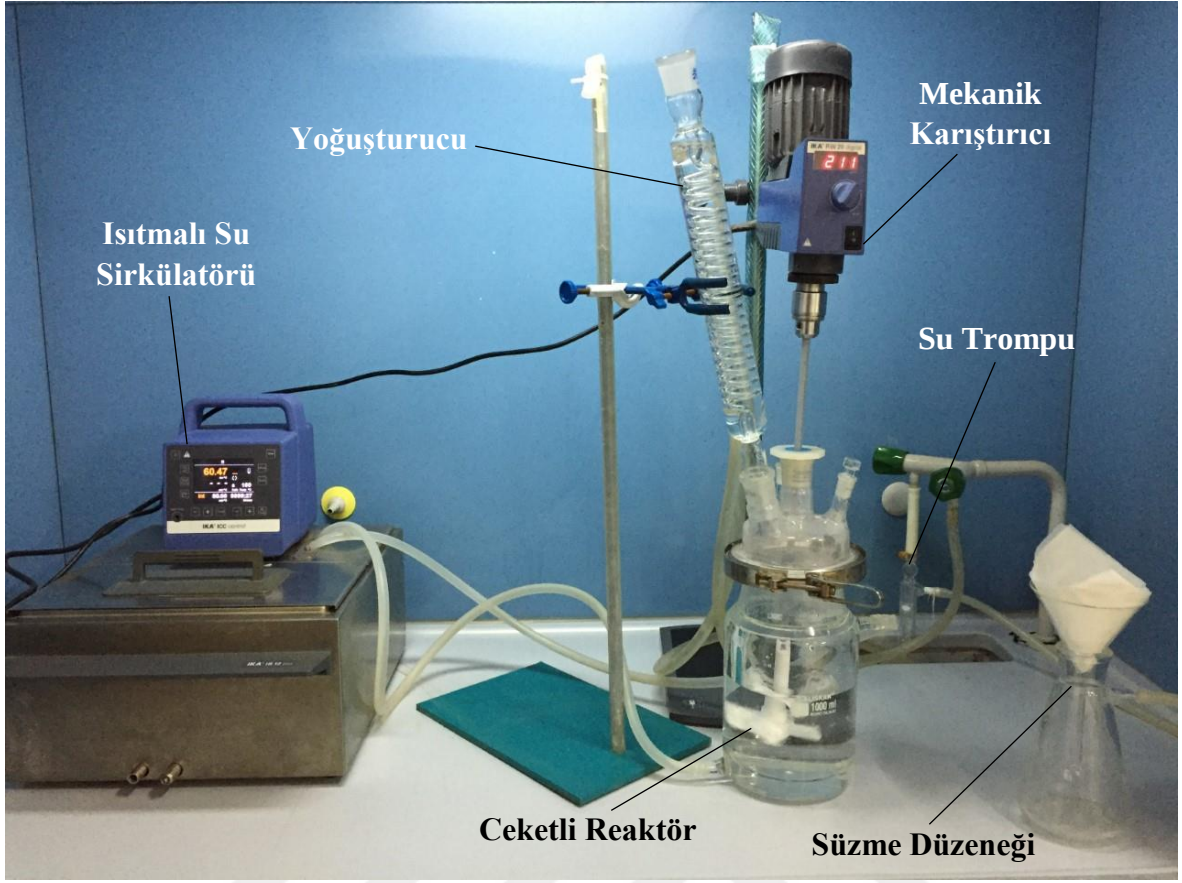
edilmiştir. Bu aşamaya kadar yapılan liç çalışmaları ile alüminyum kazanımının en yüksek olduğu aşırı öğütme süresi, asit türü, liç süresi ve asit derişimi belirlenmiştir.

Pomzadan alüminyum üretimi amacıyla asitte liç işlemlerini içeren basamakların sonuncusu olarak ise daha önceden belirlenen alüminyum kazanımının en yüksek olduğu şartlarda ve çeşitli sıcaklıklarda liç işlemleri gerçekleştirilerek uygun bir liç sıcaklığı belirlenmiştir. Böylelikle liç işlemlerinin en başından sonuna kadar aşırı öğütme süresi, asit türü, liç süresi, asit derişimi ve liç sıcaklığı parametreleri incelenmiş olup alüminyum kazanımının en yüksek olduğu liç ortamı belirlenerek pomzanın asitte liçi işlemleri tamamlanmıştır. Pomzanın asitte liçi işlemleri sırasında incelenen parametreler Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2: Pomzanın asitte liçi işlemlerinde incelenen parametreler.

İncelenen Parametreler	Çalışılan Değerler
Aşırı Öğütme Süresi, dk	0**, 15, 30, 60*
Asit Türü	HCl*, H ₂ SO ₄ , HNO ₃
Liç Süresi, saat	3, 6*, 12, 24
Asit Derişimi, Molar	2, 3, 4*, 5
Liç Sıcaklığı, °C	30, 60, 80, KS*
Karıştırma Hızı***, devir/dk	600
Çözelti/Katı Oranı (ml/g)	20 (Sabit tutulmuştur.)
*: Diğer parametrelerin etkisi incelendiğinde kullanılan değer	
**: Aşırı öğütme işlemine tabi tutulmamış tüvenan pomza örneği	
***: Kaynama sıcaklığında çalışıldığından karıştırma hızı parametresi incelenmemiştir.	
KS: Kaynama sıcaklığı (~108 °C)	

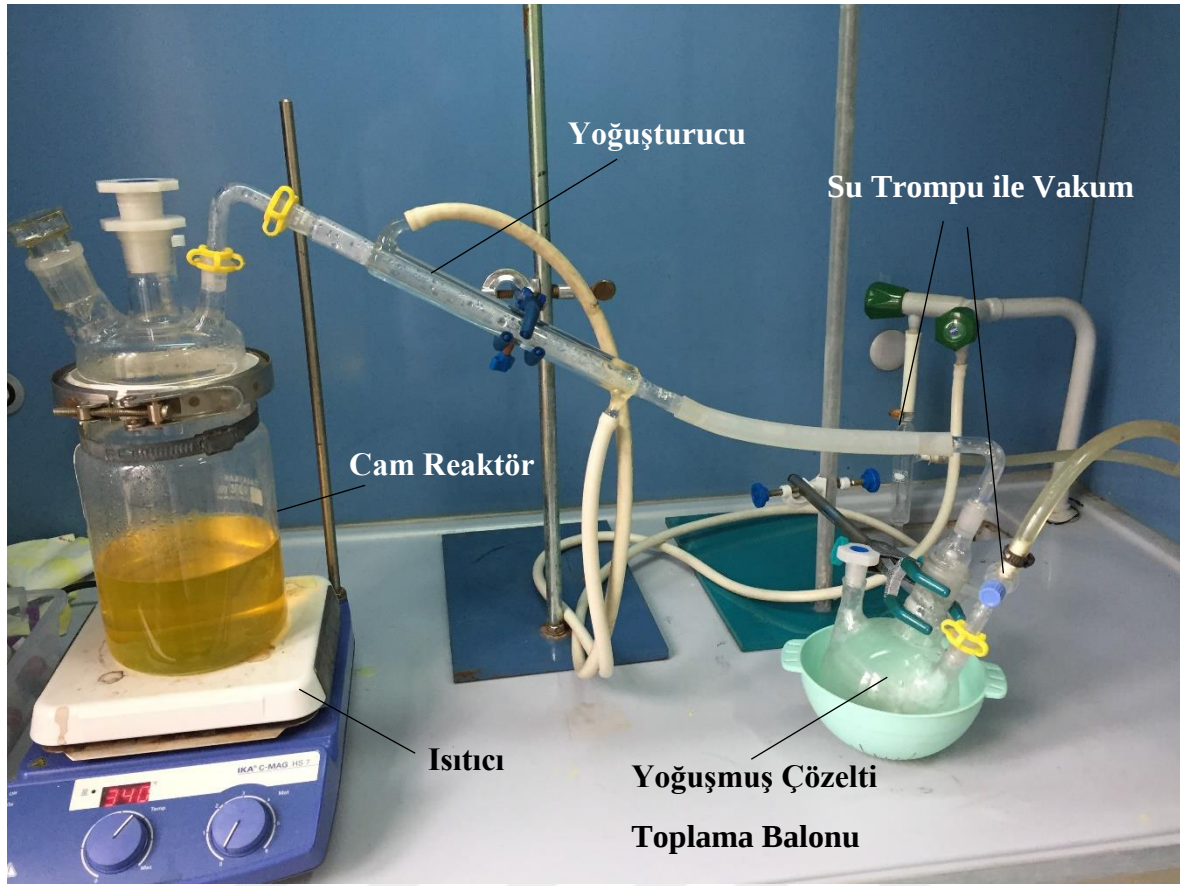
Asitte liç işlemleri, çeker ocak içerisinde bulunan 500 cm³ yatak hacmine sahip balon ısıtıcı içerisine yerleştiren 500 ml’lik cam balonda yapılmıştır. Tüvenan pomzanın liç işlemi için -75 µm tane boyutunda 10 g pomza örneği ve 200 ml asit çözeltisi kullanılmıştır. Karıştırma işlemi için manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Liç sırasında buharlaşmadan kaynaklı çözelti kaybını engellemek amacıyla balon üzerine geri soğutucu yerleştirilmiştir. Liç işlemi tamamlandıktan sonra balon ısıtıcı kapatılarak çözelti-katı ayrımı için vakum süzme işlemi yapılmıştır. Vakum süzme işlemi için kaba süzgeç kağıdı, su trompu ve nuçe



Şekil 3.6: Pomzanın asitte liçinde sıcaklık etkisini inceleme çalışmaları için kullanılan düzenek.

3.2.4. $AlCl_3$ çöktürmesi için evaporasyon işlemi

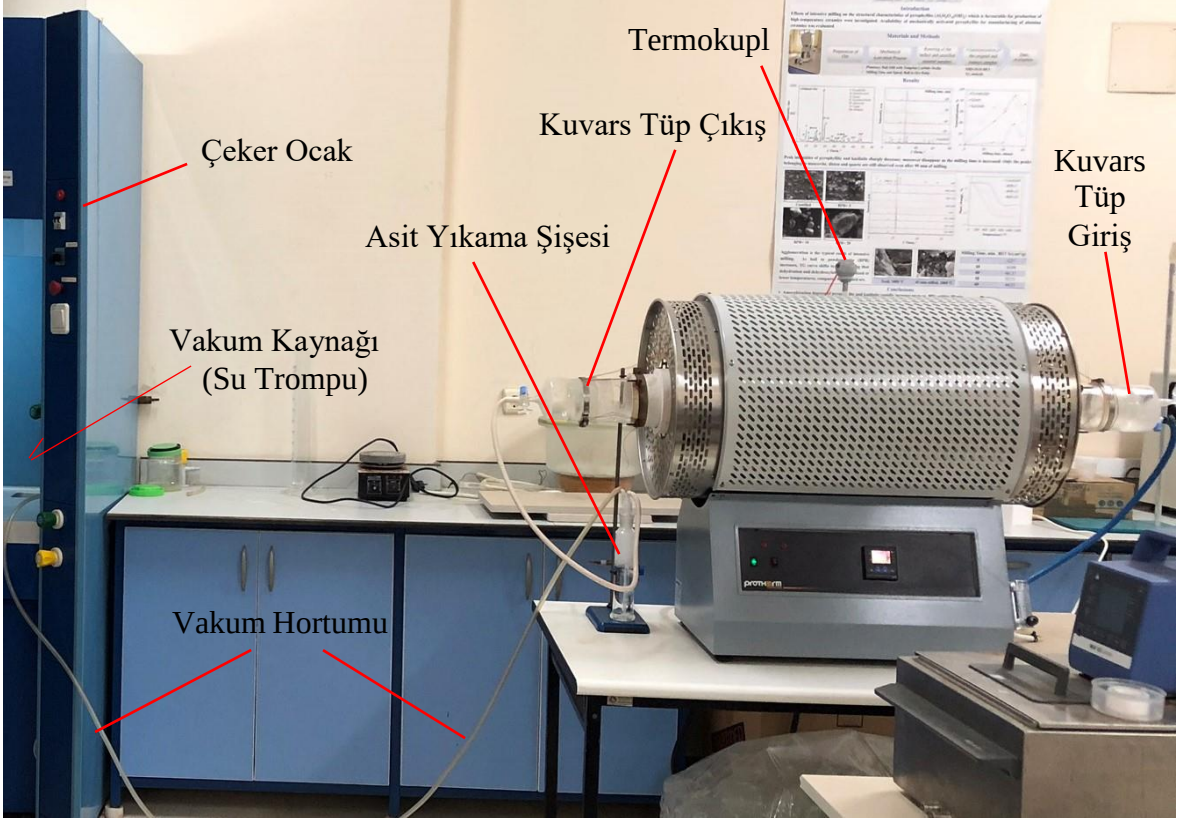
Liç işlemleri sonucunda elde edilen yüklü çözelti 1000 ml'lik cam reaktörde, kaynama sıcaklığında buharlaştırılmış (evaporasyon) ve derişik çözelti elde edilmiştir. Buharlaşan kısım ise vakum yardımıyla bir yoğuşturucudan geçirilerek ayrı bir cam balonda toplanmıştır. Böylece $AlCl_3$ yüklü derişik çözelti ise cam reaktör içerisinde kalmıştır. Evaporasyon yöntemiyle $AlCl_3$ eldesi Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Evaporasyon düzeneği.

3.2.5. Alümina üretimi için $AlCl_3$ 'ün Bozuşturma Kavurması

Evaporasyon işlemi ile elde edilen $AlCl_3$, 1200 °C'de bozuşturma kavurmasına tabi tutularak alümina üretilmiştir. Bozuşturma kavurması işlemi 1400 °C sıcaklığa kadar çıkabilen tüp fırın (Protherm PTF14/105/45) içerisinde gerçekleştirilmiştir. $AlCl_3$ 'ün fırına beslenmesi işlemi alümina krozellerle yapılmıştır. Kavurma düzeneği, fırın içerisindeki mullit tüpün içine kuvars bir tüp yerleştirilerek kurulmuştur. Kuvars tüp sayesinde fırına dışarıdan gaz beslenebilmesi, uçucu tuzlar ve zararlı gazların kontrollü şekilde geri kazanılabilmesi veya uzaklaştırılabilmesi sağlanmıştır. Oluşan zararlı gaz ve asit buharı, çıkışı vakum kaynağına bağlı bir gaz yıkama şişesi içerisinde geçirilerek çeker ocak vasıtasıyla uzaklaştırılmıştır. Gaz yıkama şişesi içerisinde bulunan alkali çözelti sayesinde zararlı gaz ve asit buharının atmosfere zararsız şekilde salınması sağlanmıştır. Bozuşturma kavurması düzeneği Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8: Tüp fırın ve bozuşturma kavurması düzeneği.

3.2.6. Analiz donanım ve yöntemleri

Tez çalışmaları sırasında, tüvenan ve aşırı öğütülmüş pomzanın mineralojik içeriğinin ve kristal yapısının saptanması amacıyla X-ışınları difraktometresi (XRD) analizleri yapılmıştır. Analizler, tarama hızı 2°/dk, difraksiyon açıları 2-80° aralığında belirlenmiş olup İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Merkezi (İBTAM) laboratuvarında yaptırılmış ve XRD desenleri incelenmiştir. Mineralojik içeriğin tespiti amacıyla cihaz ile entegre şekilde çalışan bir mineral kütüphanesinden yararlanılmıştır.

Yapılan XRD analizleri ile tüvenan pomza ile aşırı öğütülmüş pomzanın kristal yapıları karşılaştırılmış ve pomzanın kristal yapısında oluşan değişiklikler ile liç verimi arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Ayrıca pomzanın yapısında bulunan minerallerin tespiti ile pomzada bulunan Al'in kaynağı belirlenmeye çalışılmıştır.

Pomzanın mikromorfolojik özelliklerinin belirlenmesinde, taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizlerinden yararlanılmıştır. Analizler İBTAM SEM laboratuvarında yapılmıştır. SEM analizleri ile malzemenin gözenek yapısı da incelenmiştir.

Farklı sürelerde aşırı öğütülmüş pomzanın tane boyut dağılımının belirlenmesi amacıyla Maden Mühendisliği bölüm laboratuvarında bulunan Malvern MasterSizer 2000 cihazıyla tane boyutu analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda pomzanın her bir öğütme süresinde ayrı ayrı kümülatif elek altı yüzdeleri incelenip karşılaştırılarak öğütme süresinin pomzanın tane boyutuna etkisi ortaya konulmuş ve tane boyutunda oluşan değişikliklerin liç verimine etkisi olup olmadığı incelenmiştir. Analizlerin yapıldığı MasterSizer 2000 cihazı Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9: Tane boyut dağılımı analiz cihazı.

Tane boyut analizlerinin yanında öğütme ile malzemenin yüzey alanında oluşan değişikliklerin belirlenmesi amacıyla da BET yüzey alanı ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler, N_2 gazı adsorpsiyonu yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonucunda öğütme süresinin yüzey alanına etkileri incelenerek karşılaştırılmıştır.

Tüvenan pomzanın, liç atıklarının ve üretilen pomza alüminasının kimyasal içeriğinin tespiti amacıyla ICP-ES analizleri yapılmıştır. Analizler, Kanada’da bulunan Bureau Veritas Mineral Laboratories isimli analiz firmasına hizmet alımı yoluyla yaptırılmıştır.

Pomzanın asitte liçi işlemleri sonucunda çözeltiye geçen Al miktarının tespiti amacıyla İnönü Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü’nde bulunan alevli atomik adsorpsiyon spektroskopisi (FAAS) cihazı (Şekil 3.10.) kullanılmıştır. FAAS ile alüminyum ölçümleri için hava, asetilen ve azot protoksit gazları kullanılmış ve normal linear fit grafik türünde, 309,3 nm dalga boyunda adsorpsiyon yöntemiyle çalışılmıştır. Ayrıca kullanılan oyuk katot lambasının akımı da %75 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.10: FAAS cihazı görünümü.

FAAS analizleri ile çözeltiye geçen Al miktarının tayini tez çalışmalarının en önemli aşamalarından birisidir. Liç işlemine tabi tutulan pomzanın Al yüzdesi daha önceden belirlenmiş olduğundan FAAS analizi ile liç işlemi ile çözeltiye geçen Al miktarı tespit edilerek Al kazanım verimi (%) hesaplanmıştır (Eşitlik 3.1.).

$$\%Al = \frac{\text{Çözeltiye geçen Al miktarı}}{\text{Beslenen cevherin Al miktarı}} \times 100 \quad (3.1)$$

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu bölümünde, pomzanın karakterizasyonu, mekanik aktivasyon için aşırı öğütme, pomzanın asitte liçi, $AlCl_3$ çöktürmesi amacıyla evaporasyon ve alümina üretimi için bozuşturma kavurması işlemlerinden elde edilen bulgular değerlendirilerek tartışılacaktır.

4.1. Pomzanın Karakterizasyonu Çalışmaları

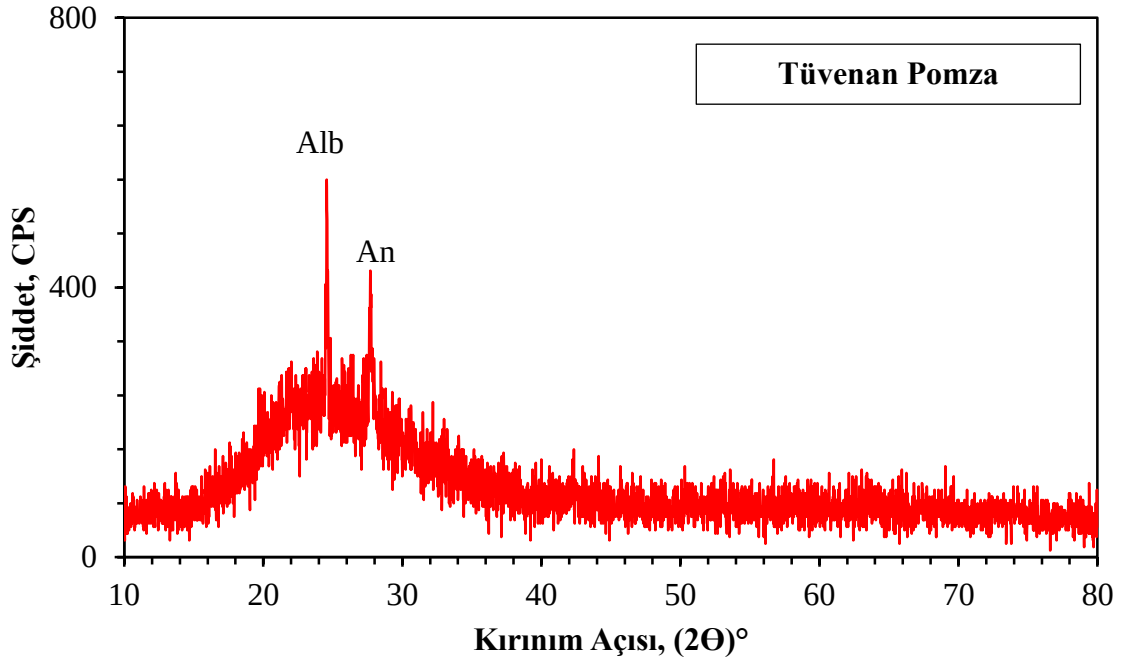
Pomzanın kimyasal içeriğinin belirlenmesi amacıyla tüvenan pomzaya ICP-ES analizi yapılmış ve elde edilen sonuçtan yola çıkılarak devamındaki çalışmalara yön verilmiştir. Tüvenan pomzanın kimyasal analizi Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1: Tüvenan pomzanın kimyasal içeriği. (A.K.: Ateşte kayıp)

SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	TiO ₂ %	P ₂ O ₅ %	MnO %	A.K. %
64,64	14,85	3,90	0,83	2,41	3,74	3,28	0,77	0,15	0,07	5,2

Tüvenan pomzanın kimyasal içeriği incelendiğinde SiO₂ içeriğine bakılarak kayacın asidik pomza olduğu anlaşılmaktadır. Çalışmalar kapsamında alümina üretimi üzerinde durulduğundan Al₂O₃ yüzdesi önem arz etmektedir. Tüvenan pomzanın Al₂O₃ yüzdesine bakıldığında hidrometalurjik yöntemlerle alümina üretimi için tatmin edici düzeyde olduğu söylenebilir. Asitte liç çalışmaları sırasında diğer metallerinde çözeltiye geçeceği düşünüldüğünde özellikle Fe₂O₃ ve CaO yüzdelерinin istenmeyen düzeyde yüksek olduğu görülmektedir. Bu metallerin alümina kalitesini düşürücü etki yapmasından dolayı bir şekilde uzaklaştırılması gerekliliği bulunmaktadır. Ayrıca Na₂O ve K₂O yüzdelерinin de nispeten yüksek olduğu görülmekle beraber liç işlemi sırasında Na, K uçucu tuzlarına dönüşecekleri ve bozuşturma kavurması sırasında sıcaklık etkisiyle uzaklaşabilecekleri bu nedenle üretilen pomza alüminası içeriğinde bulunmayacakları veya eser düzeyde bulunacakları öngörülmektedir.

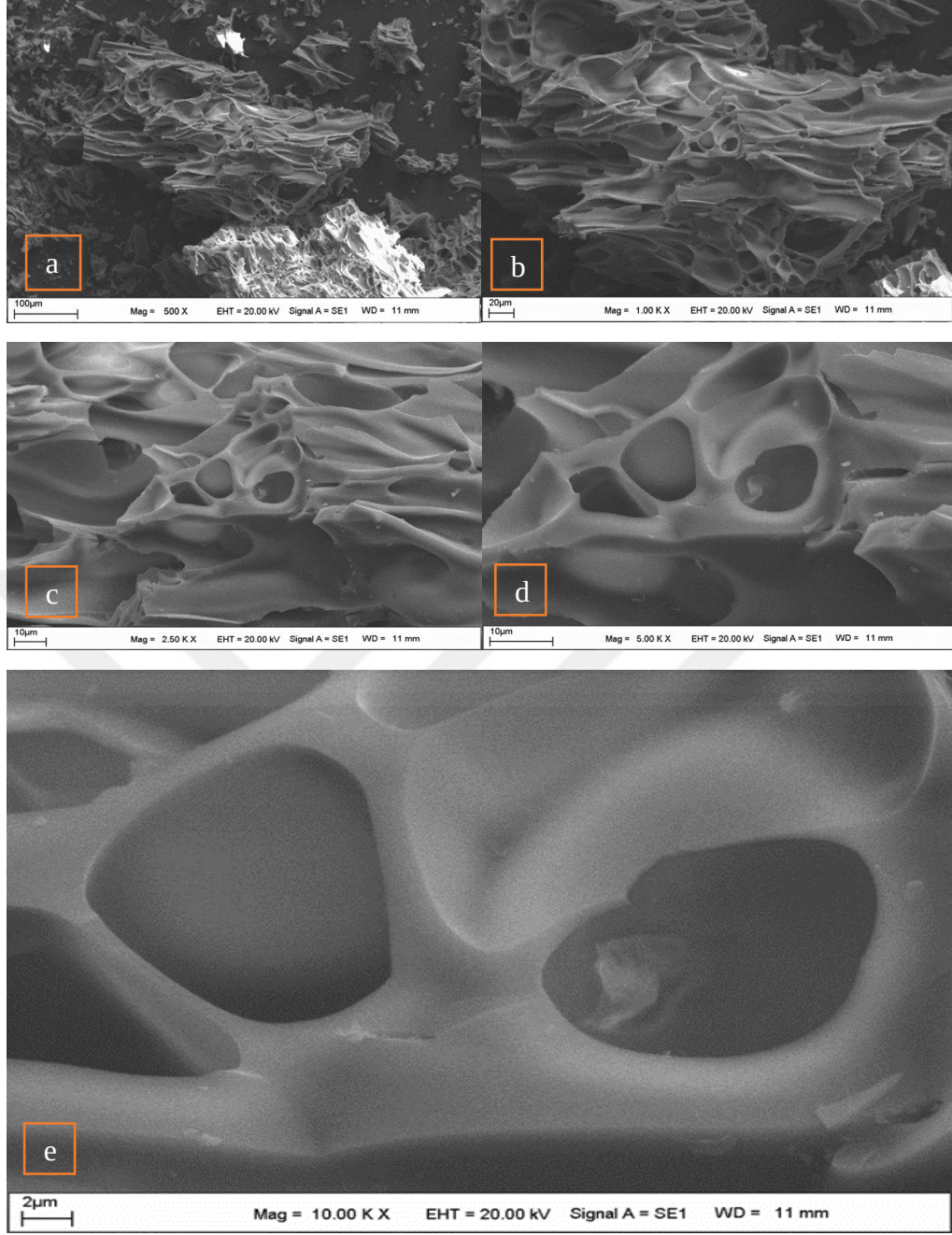
Tüvenan pomzanın kimyasal içeriğinin tespiti sonrası, kimyasal içerikte bulunan elementlerin, özellikle Al'nin kaynak mineral veya minerallerinin tespiti ve tüvenan pomzanın kristal yapısının belirlenmesi amaçlarıyla XRD analizleri yapılmıştır (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1: Tüvenan pomza XRD deseni (Alb: Albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), An: Anortit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$))

Tüvenan pomzanın XRD desenine bakıldığında genel olarak amorf yapıda olduğu ancak 20-30° kırınım açısı aralığında iki adet pik olduğu görülmektedir. XRD cihazında bulunan mineral kütüphanesi kullanılarak yapılan faz analizleri sonucunda bu piklerin Albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) ve Anortit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) minerallerine ait pikler olduğu tespit edilmiştir. Tespit edilen iki mineralinde alüminyum silikat minerali olduğu görülmekte ve tüvenan pomzanın içeriğinde bulunan Al_2O_3 'ün kaynağı net bir biçimde anlaşılmaktadır. Ayrıca iki mineralin kimyasal formüllerine ayrı ayrı bakıldığında sodyum (Na) ve kalsiyum (Ca) elementlerini içerdikleri görülmekte ve tüvenan pomza içeriğinde bulunan Na_2O ve CaO 'in kaynağının da albit ve anortit mineralleri olduğu anlaşılmaktadır.

XRD analizleri neticesinde kristal ve mineralojik yapısı aydınlatılmış olan pomzanın fiziksel iç yapısının da aydınlatılması amacıyla SEM analizleri yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.2'de görülmektedir.



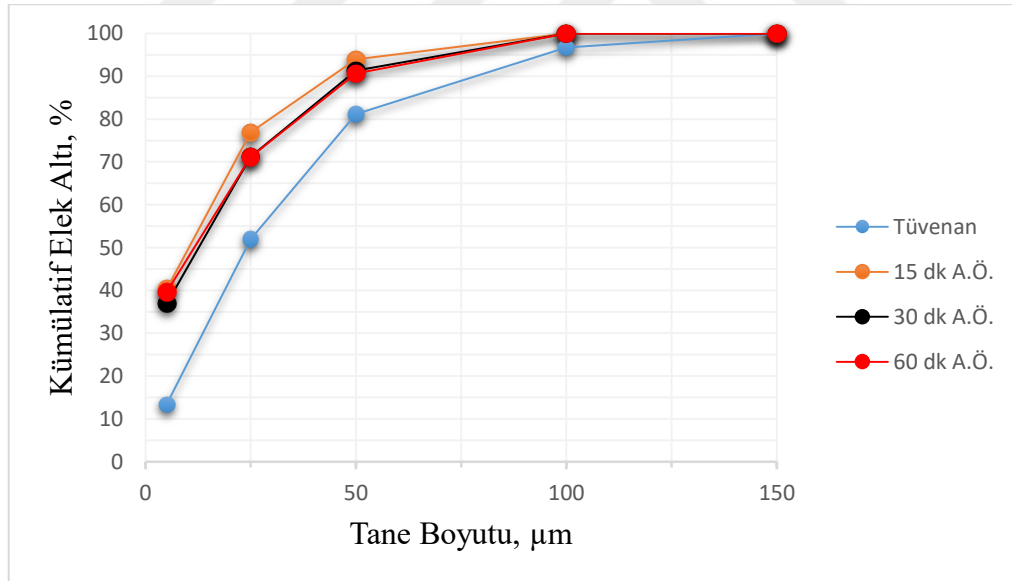
Şekil 4.2: Tüvenan pomza SEM görüntüleri (a:500X, b:1000X, c:2500X, d:5000X, e:10000X).

Tüvenan pomza örneğinin belirlenen bir noktasının 500, 1000, 2500, 5000 ve 10000 kat oranlarında büyütülerek çekilen SEM görüntülerinde pomzanın yüksek poroziteli ve lifsi bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. SEM görüntülerine bakılarak pomzanın düşük özgül ağırlığının, yüksek poroziteli bir yapıya sahip olmasından kaynaklandığı anlaşılmaktadır.

Tüvenan ve aşırı öğütülmüş pomza örneklerinin tane boyu dağılım analizi yapılmış ve kümülatif elek altı yüzdeleri Çizelge 4.2’de, kümülatif elek altı eğrisi ise Şekil 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4.2: Kümülatif elek altı.

Tane Boyutu, μm	Pomza Örneği			
	Tüvenan	15 dk A.Ö.	30 dk A.Ö.	60 dk A.Ö.
	Kümülatif Elek Altı, %			
-150 +100	100	100	100	100
-100 +50	96,73	100	100	100
-50 +25	81,18	93,99	91,31	90,64
-25 +5	51,98	76,91	71,26	71,17
-5	13,39	40,29	36,88	39,63



Şekil 4.3: Tüvenan ve aşırı öğütülmüş pomza örneklerinin tane boyu dağılım eğrisi.

Kümülatif elek altı eğrisi incelendiğinde aşırı öğütme süresi arttıkça tüvenan pomzaya göre aşırı öğütülmüş pomzanın tane boyutunun azaldığı ancak aşırı öğütülmüş pomza örnekleri kendi arasında kıyaslandığında öğütme süresi artışıyla birlikte tane

boyutunun da artış gösterdiği görülmüştür. Bu durumun öğütme süresi artışıyla birlikte tanelerin aglomera olması sebebiyle gerçekleştiği düşünülmektedir.

Ayrıca örneklerin her birinde elek altına geçen ürünlerin %50'sinin tane boyutu (d_{50}) ve %90'ının tane boyutu (d_{90}) Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3: Tüvenan ve aşırı öğütülmüş pomza örneklerinin d_{50} ve d_{90} değerleri.

Pomza Örneği	d_{50} (μm)	d_{90} (μm)
Tüvenan	25,05	67,95
15 dk Aşırı Öğütülmüş	8,44	43,30
30 dk Aşırı Öğütülmüş	11,38	49,68
60 dk Aşırı Öğütülmüş	10,34	51,10

Çizelge 4.3. incelendiğinde tüvenan pomzanın tane boyutunun aşırı öğütmeyle birlikte küçüldüğü ancak aşırı öğütülmüş örneklerin tane boyutlarının kendi arasında artış gösterdiği görülmektedir.

Tane boyut analizlerinin ardından aşırı öğütme sonucu pomzanın yüzey alanında meydana gelen değişiklikleri görmek amacıyla BET yüzey alanı analizleri yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.4'de verilmiştir.

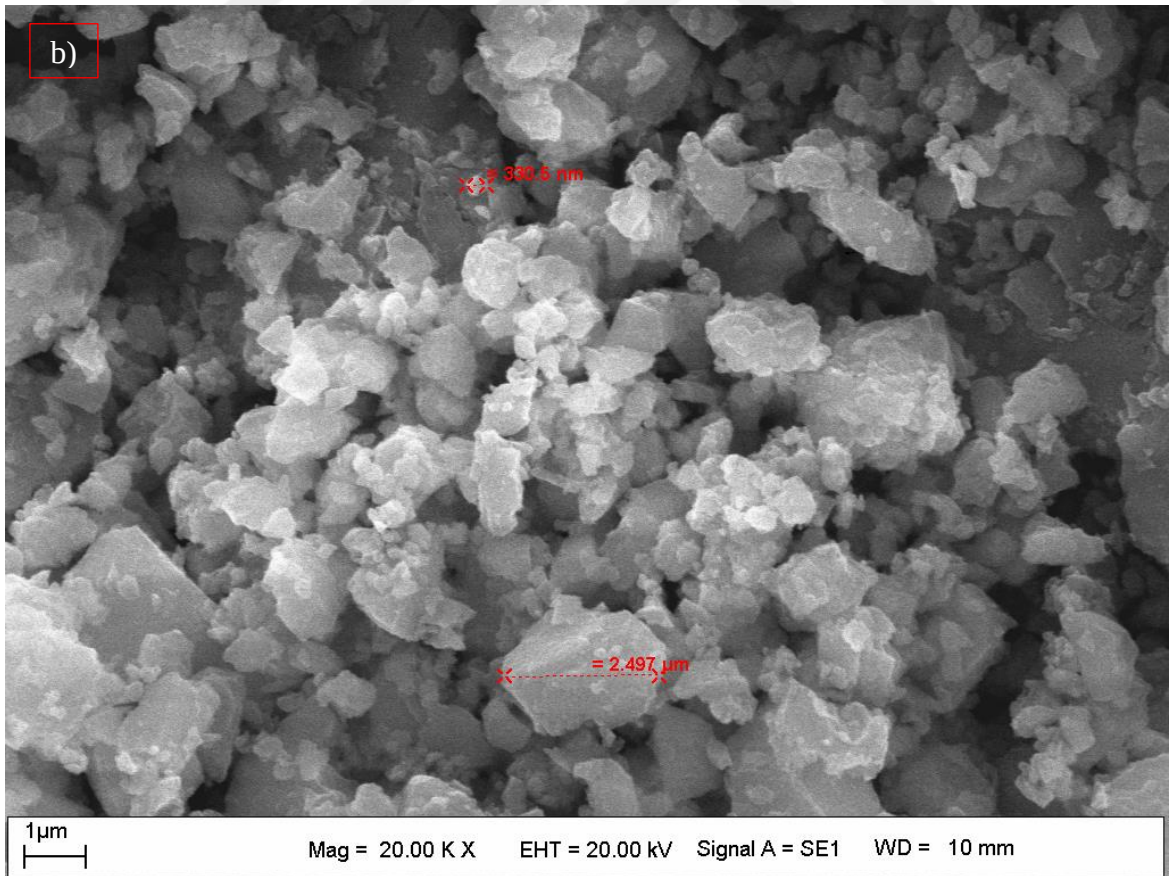
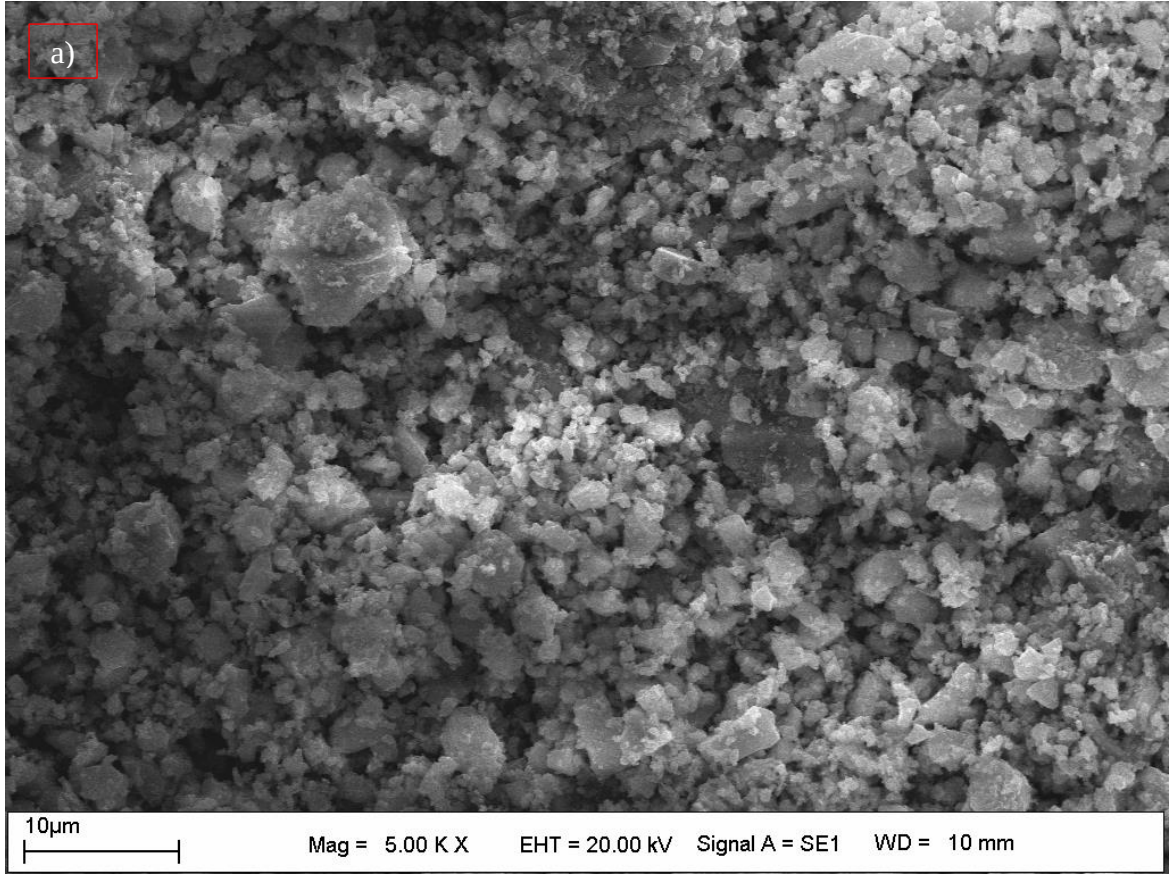
Çizelge 4.4: Tüvenan ve aşırı öğütülmüş pomza örneklerinin BET yüzey alanları.

Pomza Örneği	BET Yüzey Alanı, m^2/g
Tüvenan	2,8519
15 dk Aşırı Öğütülmüş	6,8974
30 dk Aşırı Öğütülmüş	7,8506
60 dk Aşırı Öğütülmüş	9,7340

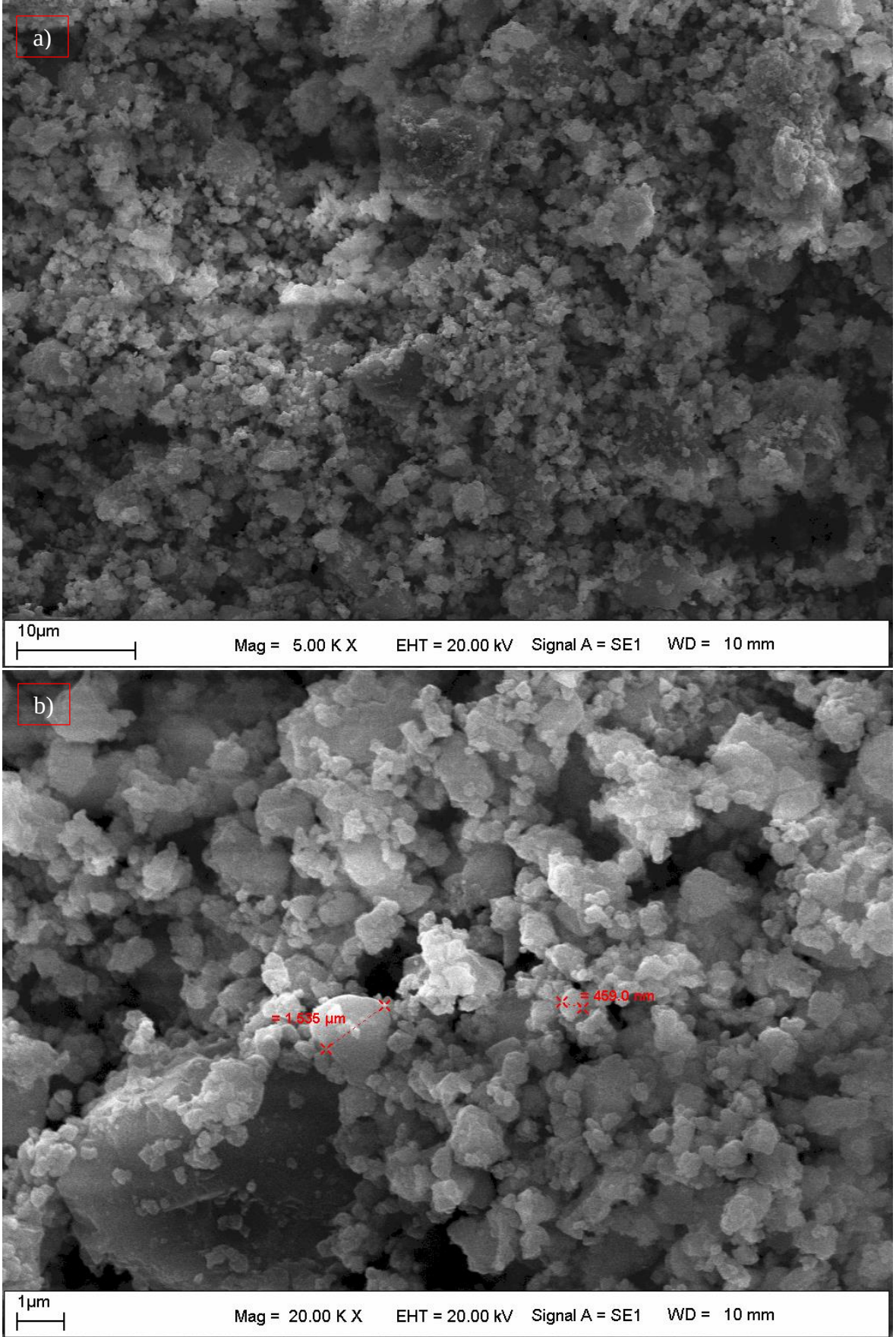
Çizelge incelendiğinde öğütme süresi arttıkça yüzey alanının da büyüdüğü görülmektedir.

Aşırı öğütülmüş pomzanın iç yapısının aydınlatılması amacıyla aşırı öğütülmüş örneklerin SEM analizleri de yapılmıştır. 15 dakika aşırı öğütülmüş pomza örneğinin SEM görüntüleri Şekil 4.4'te, 30 dakika aşırı öğütülmüş pomza örneğinin SEM görüntüsü Şekil 4.5'te, 60 dk aşırı öğütülmüş pomza örneğinin SEM görüntüsü Şekil 4.6'da verilmiştir.

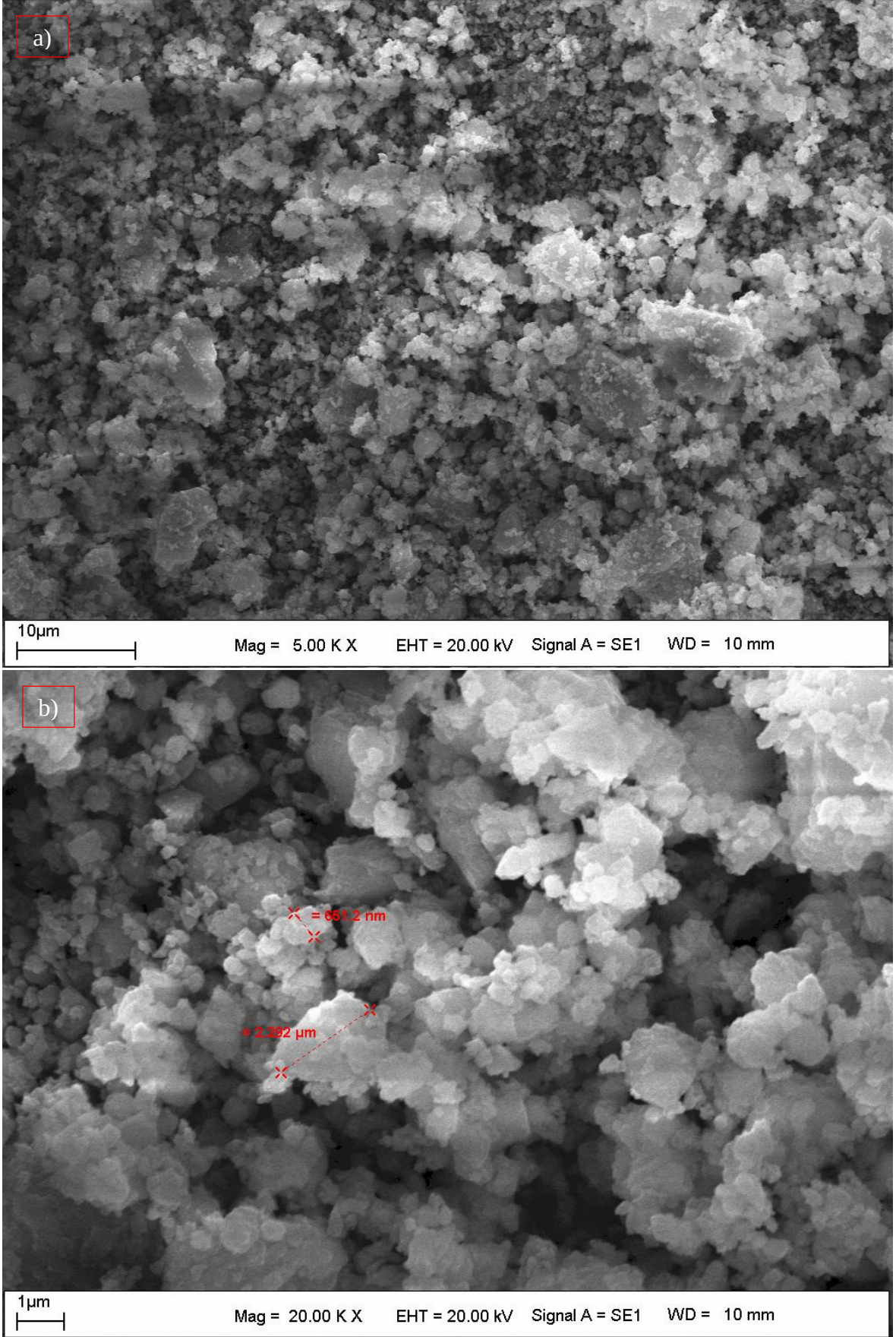




Şekil 4.4: 15 dk aşırı öğütülmüş pomza SEM görüntüsü. (a: 5.000 kat büyütme, b: 20.000 kat büyütme)



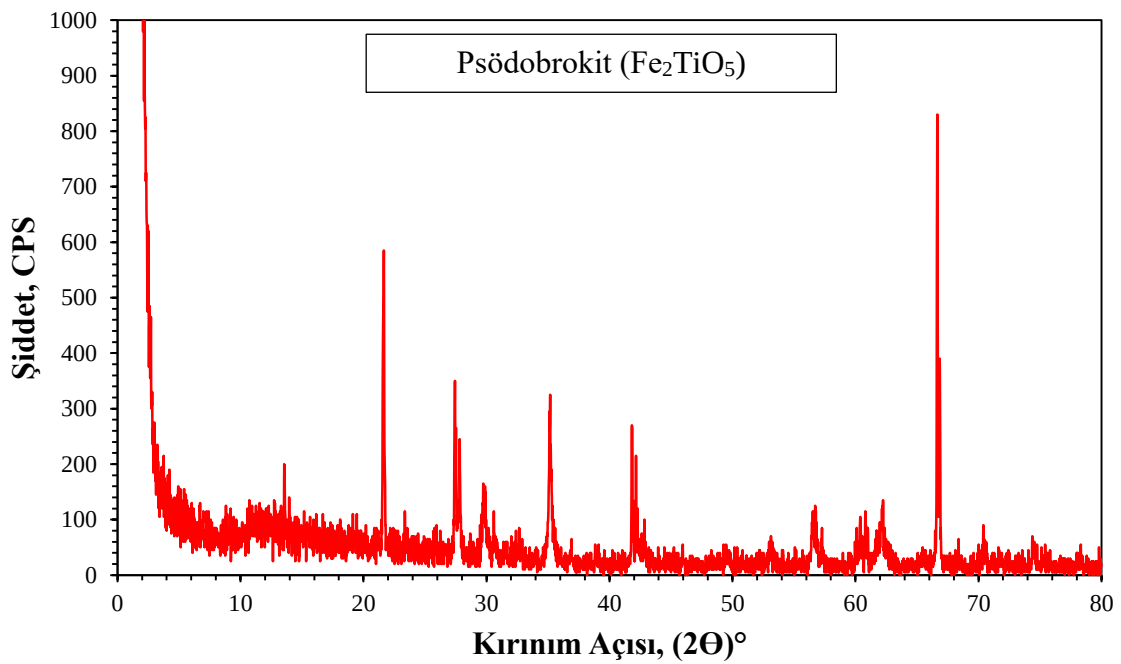
Şekil 4.5: 30 dk aşırı öğütülmüş pomza SEM görüntüsü. (a: 5.000 kat büyütme, b: 20.000 kat büyütme)



Şekil 4.6: 60 dk aşırı öğütülmüş pomza SEM görüntüsü. (a: 5.000 kat büyütme, b: 20.000 kat büyütme)

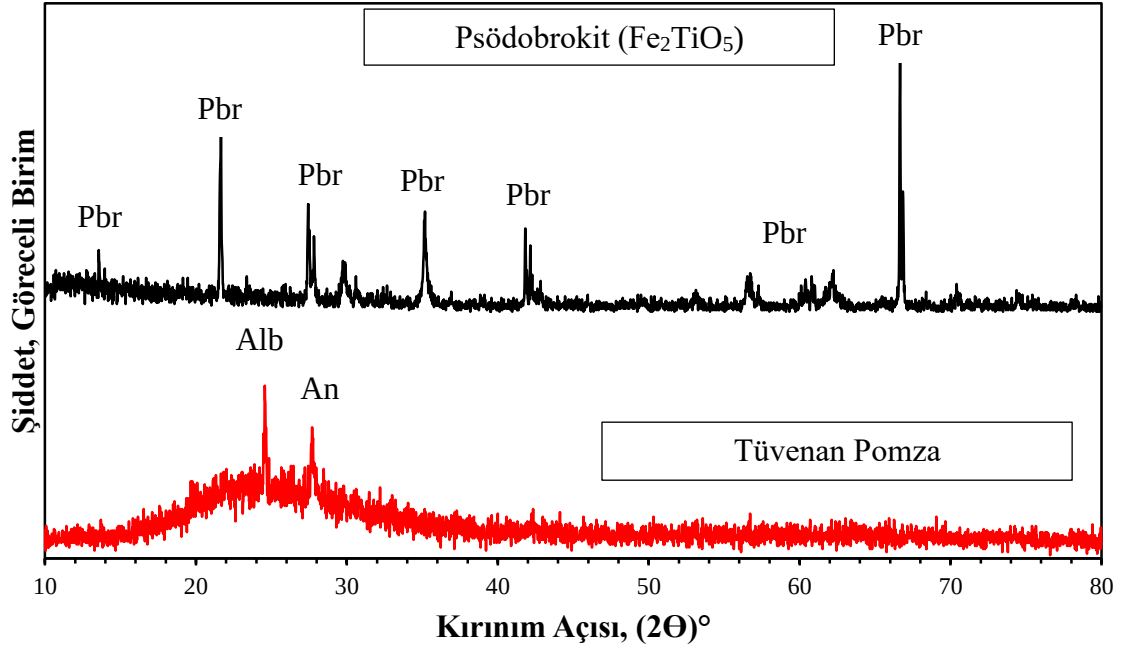
Aşırı öğütölmüş pomza örneklerinin SEM görüntülerine bakıldığında tüvenan pomzanın aksine düşük poroziteli bir yapıya sahip olduğu ve tanelerin aşırı öğütmeden kaynaklı olarak aglomera olduğu görölmektedir.

Ayrıca tüvenan pomza içeriğinde ferromanyetik özellik gösteren bir malzeme tespit edilmiş ve bu malzemenin ortaya çıkarılması amacıyla XRD analizi yapılmıştır. Ferromanyetik malzemenin XRD deseni Şekil 4.7’de, tüvenan pomza ile karşılaştırmalı XRD deseni ise Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.7: Ferromanyetik özellik gösteren malzeme XRD deseni

XRD analizi ile birlikte yapılan faz analizi sonucunda ferromanyetik özellik gösteren malzemede Fe_2TiO_5 (ya da $(\text{Fe}^{3+}, \text{Fe}^{2+})_2(\text{Ti}, \text{Fe}^{2+})\text{O}_5$) mineralojik formülüyle gösterilen psödobrokit olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 4.8: Psödobrokit ve tüvenan pomza karşılaştırmalı XRD deseni. (Pbr: Psödobrokit, Alb: Albit, An: Anortit)

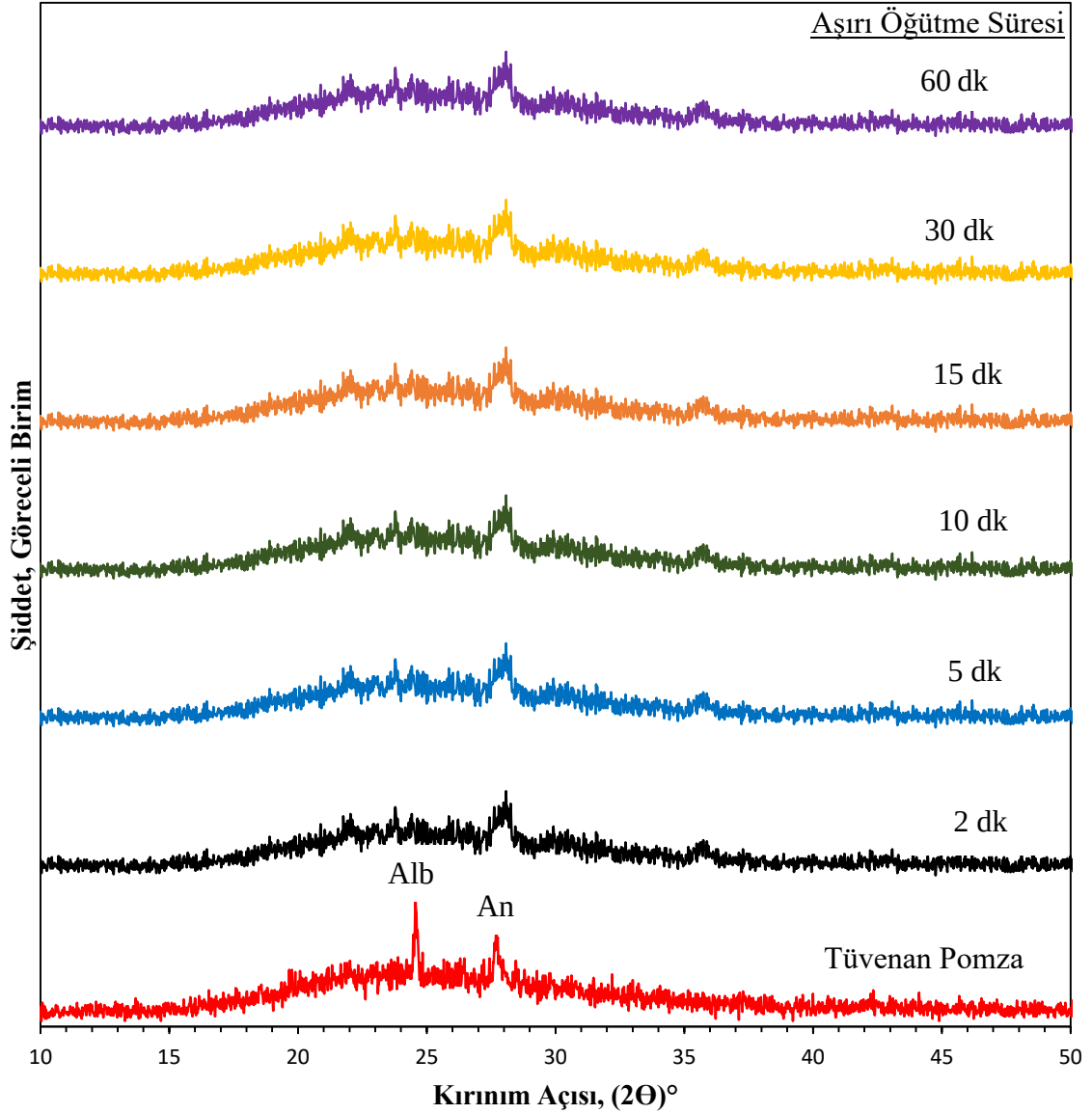
Tüvenan pomzanın kimyasal karakterizasyonun belirlenmesi amacıyla ön deneme liçleri de yapılmıştır. Ön deneme liçi için koşullar belirlenmiş (Çizelge 4.5) ve asidik liç ile çözeltiye geçen alüminyum miktarı tespit edilerek liç verimi hesaplanmıştır. Tüvenan pomzanın asitte liçi sonucunda çözeltiye alüminyum alınamamıştır. Böylelikle pomzanın tüvenan haldeyken kimyasallarla tepkime vermediği tespit edilerek literatür bilgisi doğrulanmıştır (Anonim, 2021c). Pomzanın asitlerle reaksiyona girmesi için mekanik olarak aktifleştirilmesi gerekliliği doğmuş ve bu kapsamda aşırı öğütme işlemleri yapılmıştır.

Çizelge 4.5: Tüvenan pomzanın ön deneme liç koşulları.

Liç Süresi, saat	24
Asit Türü	HCl
Liç Sıcaklığı, °C	KS
Asit Derişimi, Molar	4
Çözelti/Katı Oranı (ml/g)	20
Karıştırma Hızı, devir/dk	600
KS: Kaynama sıcaklığı (~108 °C)	

4.2. Mekanik Aktivasyon için Aşırı Öğütme

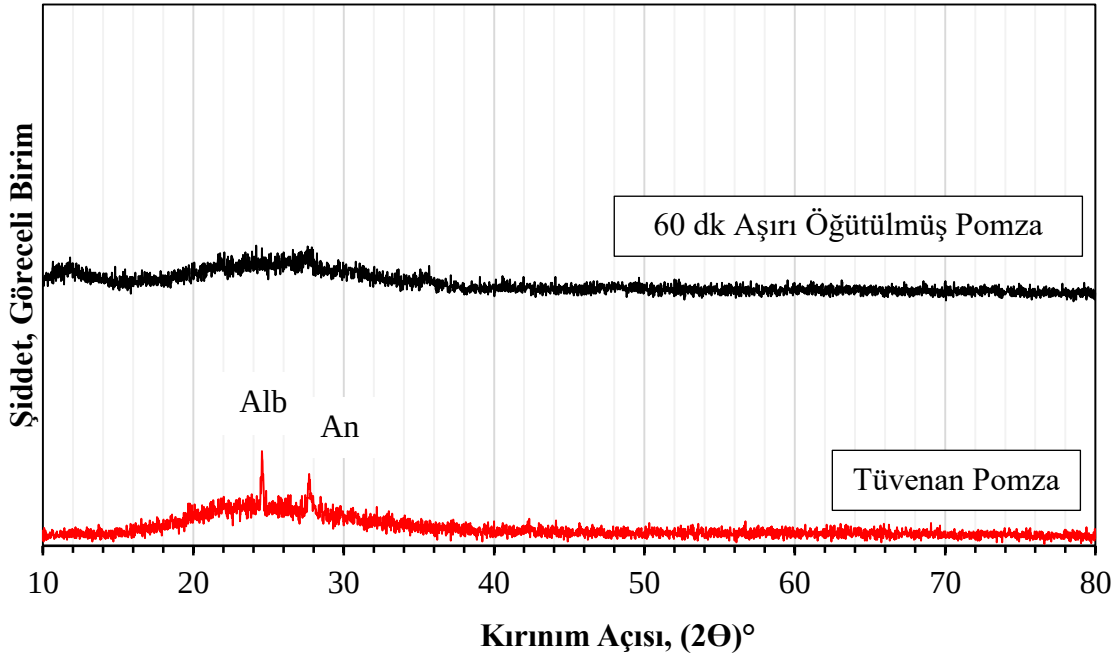
Tüvenan pomzanın mekanik aktifleştirilmesi amacıyla aşırı öğütme işlemleri yapılmış ve işlem sonucunda kristal yapısındaki değişimlerin incelenmesi amacıyla XRD analizleri yapılmıştır. Analizler sonucu elde edilen XRD desenleri Şekil 4.9'da görülmektedir.



Şekil 4.9: Tüvenan ve aşırı öğütülmüş pomza örneklerinin karşılaştırmalı XRD deseni (Alb: Albit, An: Anortit)

Tüvenan ve aşırı öğütülmüş pomza örneklerinin karşılaştırmalı XRD deseni incelendiğinde, Albit mineraline ait pikin 2 dk aşırı öğütmeden itibaren amorflaşarak kaybolduğu görülmektedir. Anortit mineraline ait pikin ise 2, 5 ve 10 dk aşırı öğütme

sürelerinde tüvenan pomzadaki pike göre daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Tüvenan pomza bünyesinde Albit ve Anortit dışında minerallerinde bulunduğu ancak amorf yapıdan dolayı tespit edilemediği ve 15 dk aşırı öğütmeye kadar olan bölümde bu tespit edilemeyen minerallerin amorflaşarak piklerinin kaybolması neticesinde Anortit mineraline ait pikin daha belirgin hale geldiği düşünülmektedir. 15 dk aşırı öğütme ile birlikte ise kristal piklerin kaybolmaya başladığı ve 60 dk aşırı öğütme sonunda pomzanın neredeyse tamamen amorflaştığı görülmektedir. Bu nedenlerle yapılacak asit liçi çalışmalarında amorflaşmanın daha net gözlendiği 15, 30 ve 60 dk aşırı öğütülmüş pomza örnekleri kullanılmıştır. 60 dk aşırı öğütülmüş pomza örneğinin XRD deseni ile tüvenan pomzanın XRD deseninin karşılaştırması Şekil 4.10'da görülmektedir.



Şekil 4.10: Tüvenan ve 60 dk aşırı öğütülmüş pomzanın karşılaştırmalı XRD deseni.

Karşılaştırmalı XRD desenine bakıldığında 60 dk aşırı öğütme sonunda pomzanın tamamen amorflaştığı, Albit ve Anortit minerallerine ait piklerin kaybolduğu görülmektedir.

4.3. Pomzanın Su ve Asitte Liçi Çalışmaları

4.3.1. Asit türü ve aşırı öğütme süresi etkisi

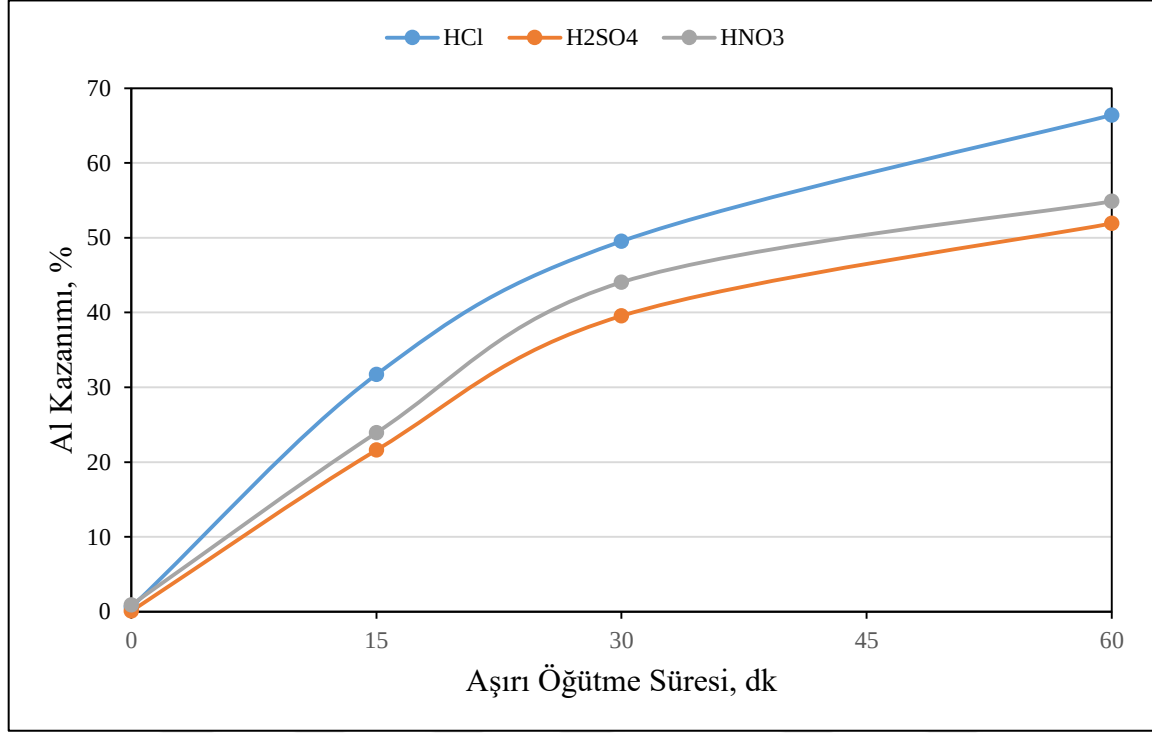
Pomzanın su ve asitte liçi çalışmaları kapsamında öncelikle su veya asit türü ve aşırı öğütme süresinin alüminyum kazanımına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla tüvenan ve farklı sürelerde aşırı öğütülmüş pomza örnekleri aynı koşullarda su ve 3 farklı asitle liçi işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan liçi işlemleri sonunda FAAS analizleri ile çözeltiye alınan alüminyum miktarları tespit edilerek alüminyum kazanımları karşılaştırılmıştır. Alüminyum kazanımının en yüksek olduğu asit ve aşırı öğütme süresi belirlendikten sonra diğer liçi parametrelerinin incelenmesine geçilmiştir. Liçi işlemleri sonucu elde edilen alüminyum kazanımları Çizelge 4.6’da görülmektedir.

Çizelge 4.6: Asit türü ve aşırı öğütme süresi çalışmaları sonucu Al kazanım verimleri.

Su ve Asit Türü	Aşırı Öğütme Süresi, dk			
	Tüvenan	15	30	60
	Al Kazanımı,%			
Su	TS	TS	TS	TS
HCl	0,6	31,71	49,53	66,40
H ₂ SO ₄	0,07	21,60	39,55	51,91
HNO ₃	0,9	23,92	44,04	54,86
Liçi işlemleri, kaynama sıcaklığında, 6 saat liçi süresinde, 20 Ç/K oranında, 600 devir/dk karıştırma hızında ve 4M asit derişiminde gerçekleştirilmiştir.				
TS: Tayin sınırının altında bir değer olduğundan FAAS cihazında derişim okunamamıştır.				

Çizelge 4.6’ya bakıldığında her üç asit türünde de aşırı öğütme süresi arttıkça Al kazanımının da arttığını ve en yüksek Al kazanımının 60 dk aşırı öğütülmüş pomza örneğinin liçi işlemlerinde olduğunu görmekteyiz. Bu bağlamda en yüksek liçi verimi 60 dk aşırı öğütülmüş pomza örneğinin liçinden elde edilmiştir. Bununla birlikte üç asitin aralarında kıyaslanması sonucu her aşırı öğütme süresinde en yüksek verimin HCl ile elde edildiği görülmüştür. Bu durumda asit türü HCl ve aşırı öğütme süresi 60 dk olarak seçilmiştir. İlerideki liçi işlemlerinin tamamında asit olarak HCl, örnek olarak ise 60 dk aşırı öğütülmüş

pomza örneğinin kullanılmasına karar verilmiştir. Al kazanımının asit türü ve aşırı öğütme süresine bağlı değişimi Şekil 4.11’de görülmektedir.



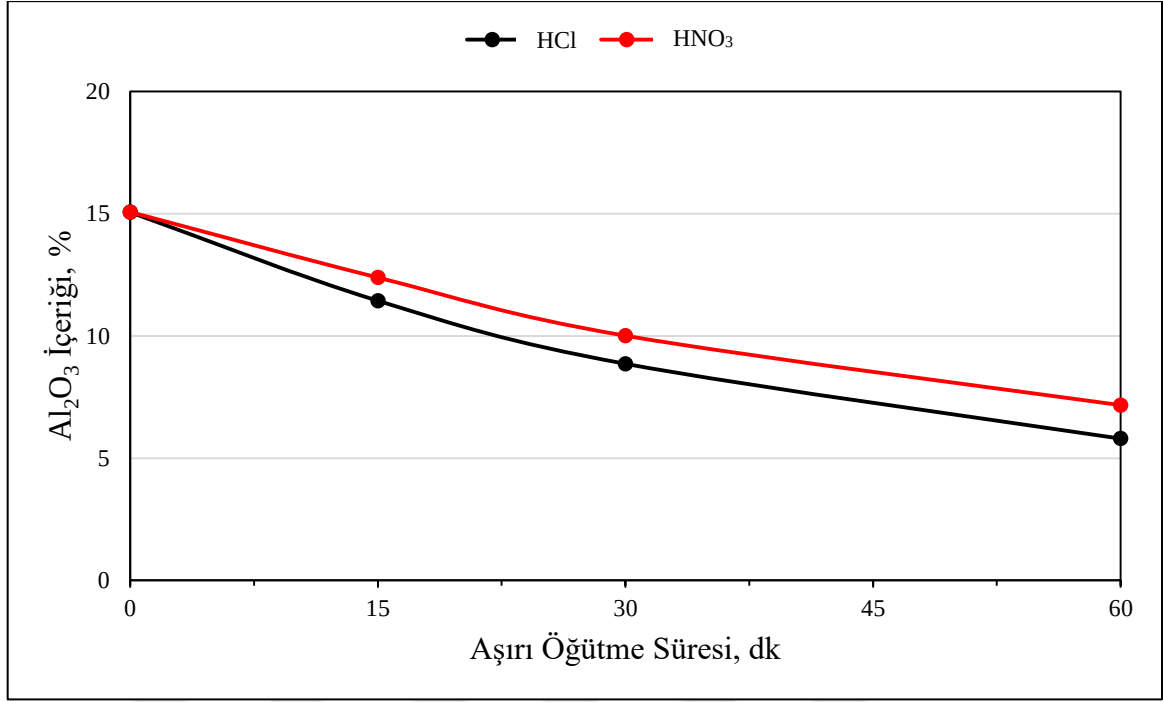
Şekil 4.11: Al kazanımının aşırı öğütme süresi ve asit türüne bağlı değişimi.

Yapılan liç işlemleri sonucu geride kalan liç atıklarının incelenmesi amacıyla ise XRD ve ICP-ES analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda liç atıklarının kristal yapıları, varsa mineralojik içerikleri ve kimyasal içerikleri tespit edilmiştir. Özellikle liç atıklarının kimyasal analizleri ile çözeltiye alınamayarak atıkta kalan Al_2O_3 yüzdesi tespit edilmiştir. Liç atıklarının kimyasal içeriği Çizelge 4.7’de görülmektedir.

Çizelge 4.7: Liç atıklarının kimyasal içeriği.

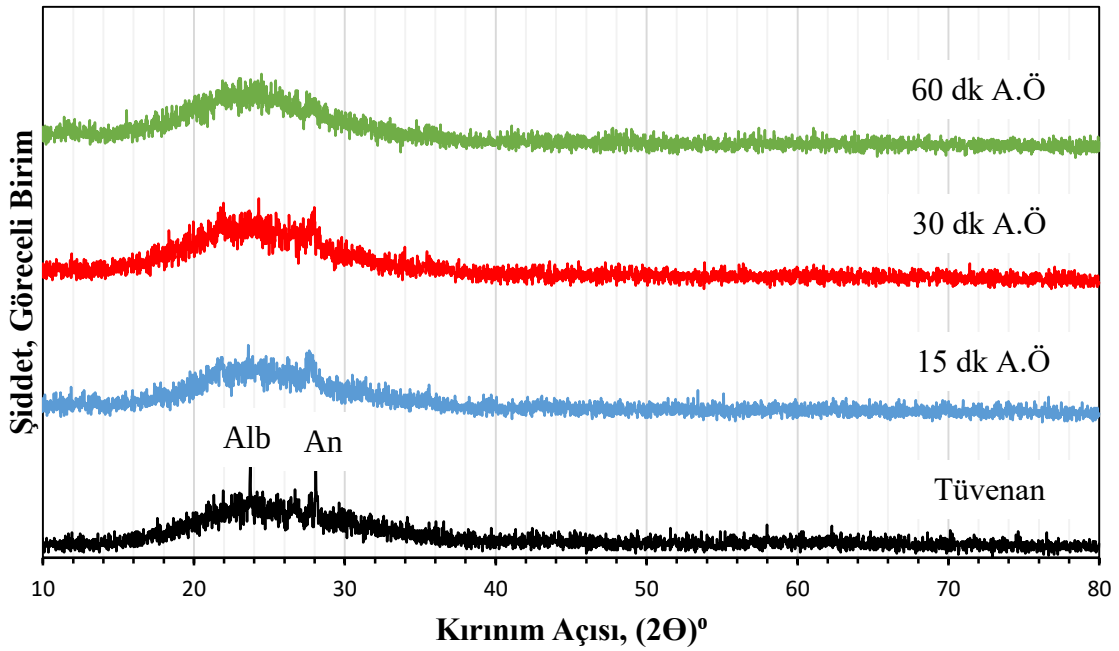
Asit Türü	Aşırı Öğütme Süresi, dk	Kimyasal İçerik, %							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Diğer
HCl	Tüvenan	70,17	15,06	3,18	0,75	2,24	4,01	3,55	1,04
	15	78,72	11,44	2,24	0,61	1,58	2,21	2,31	0,89
	30	83,79	8,86	1,61	0,45	1,13	1,50	1,68	0,98
	60	89,40	5,80	1,07	0,29	0,66	0,75	0,94	1,09
H ₂ SO ₄	Tüvenan	70,35	14,95	3,22	0,75	2,24	3,99	3,47	1,03
	15	-	-	-	-	-	-	-	-
	30	81,86	10,28	1,97	0,38	1,39	1,48	1,77	0,87
	60	-	-	-	-	-	-	-	-
HNO ₃	Tüvenan	70,16	15,07	3,16	0,75	2,28	4,03	3,49	1,06
	15	76,49	12,39	2,74	0,68	1,77	2,30	2,46	1,17
	30	81,38	10,01	2,26	0,54	1,30	1,55	1,83	1,13
	60	86,83	7,17	1,66	0,37	0,84	0,77	1,05	1,31
-: Örnek yetersizliğinden dolayı kimyasal analiz yapılamamıştır.									

Liç atıklarının kimyasal içeriğine bakıldığında üç asitle de yapılan liç işlemlerinde öğütme süresi arttıkça atıkta kalan Al₂O₃ yüzdesinin azaldığı, SiO₂ yüzdesinin arttığı görülmektedir. Ayrıca en az Al₂O₃ içeriğinin 60 dk aşırı öğütülmüş pomza örneğinin HCl ile liçi sonrası meydana gelen atıkta olduğu ve böylelikle daha önce yapılan asit ve aşırı öğütme süresi seçimlerinin yerinde olduğu bir kez daha görülmüştür. Öğütme süresi ve asit türüne bağlı olarak liç atıklarındaki Al₂O₃ yüzdesi değişimi Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12: Liç atığındaki Al₂O₃ içeriğinin asit türü ve aşırı öğütme süresine bağlı değişimi.

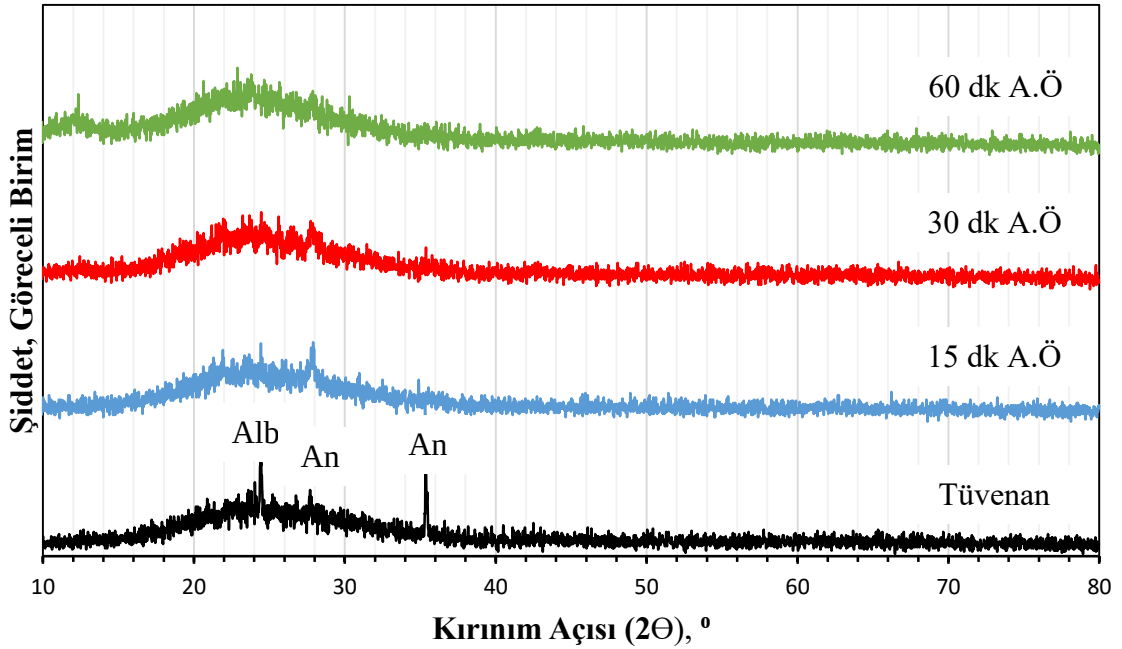
Liç atıklarının kimyasal analizlerinin ardından, atıkların mineralojik içeriğinin ve kristal yapısının belirlenmesi amacıyla yapılan XRD analizlerinden elde edilen desenler Şekil 4.13'te verilmiştir.



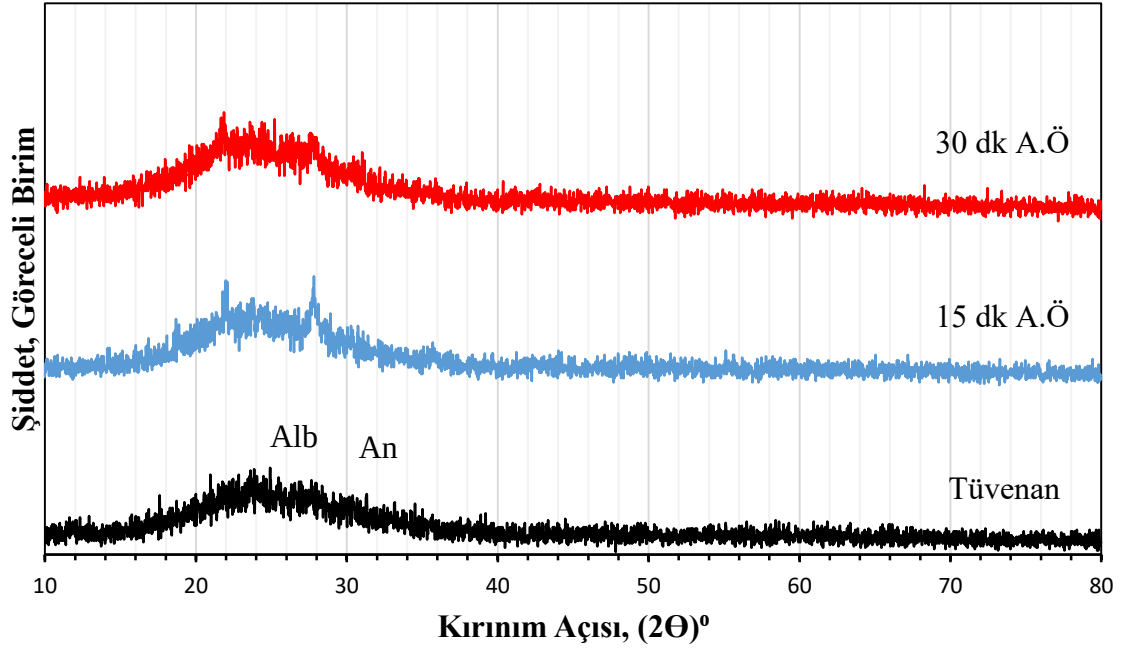
Şekil 4.13: HCl liç atıklarının karşılaştırmalı XRD desenleri. (A.Ö: Aşırı öğütme)

XRD desenleri incelendiğinde aşırı öğütme süresi arttıkça liç atıklarının amorlaşmasının da arttığı görülmektedir. Ancak şiddetleri düşük olsa da tüvenan, 15 ve 30 dk aşırı öğütülmüş pomza örneklerinin liç atıklarında albit ve anortit minerallerine ait piklere rastlanmıştır. Albit ve anortit minerallerinin Al kaynağı olduğu düşünüldüğünde liç atığında yüksek oranda alüminyum kaldığı anlaşılmış ve XRD desenlerinin atıkların kimyasal analiz sonuçlarıyla örtüştüğü görülmüştür. Kimyasal analiz sonuçlarına göre en düşük alüminyum içeriğinin 60 dk aşırı öğütülmüş pomza örneğinin liç atığında olması ve bununla birlikte XRD deseninin neredeyse tamamen amorf bir yapı göstermesi de kimyasal analiz sonuçlarını destekler niteliktedir.

Ayrıca diğer asitlerle yapılan liç işlemlerinin liç atıklarının da XRD analizleri yapılmış ve HCl'in aksine diğer iki asitle yapılan liçlerde her aşırı öğütme süresinde liç atıklarında albit ve anortit minerallerine ait kristal piklere rastlanmıştır. İki asitle yapılan liç işlemleri neticesinde açığa çıkan atıkların XRD analizlerinin sonucu ile atıkların kimyasal analiz sonuçları ve çözeltiye alınan Al miktarı analizlerinin sonuçları birbirini destekler ve tamamlar niteliktedir. Atıkların XRD desenleri Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te görülmektedir.



Şekil 4.14: HNO₃ liç atıklarının karşılaştırmalı XRD desenleri. (A.Ö: Aşırı öğütme)



Şekil 4.15: H₂SO₄ liçi atıklarının karşılaştırmalı XRD desenleri. (A.Ö: Aşırı öğütme,)

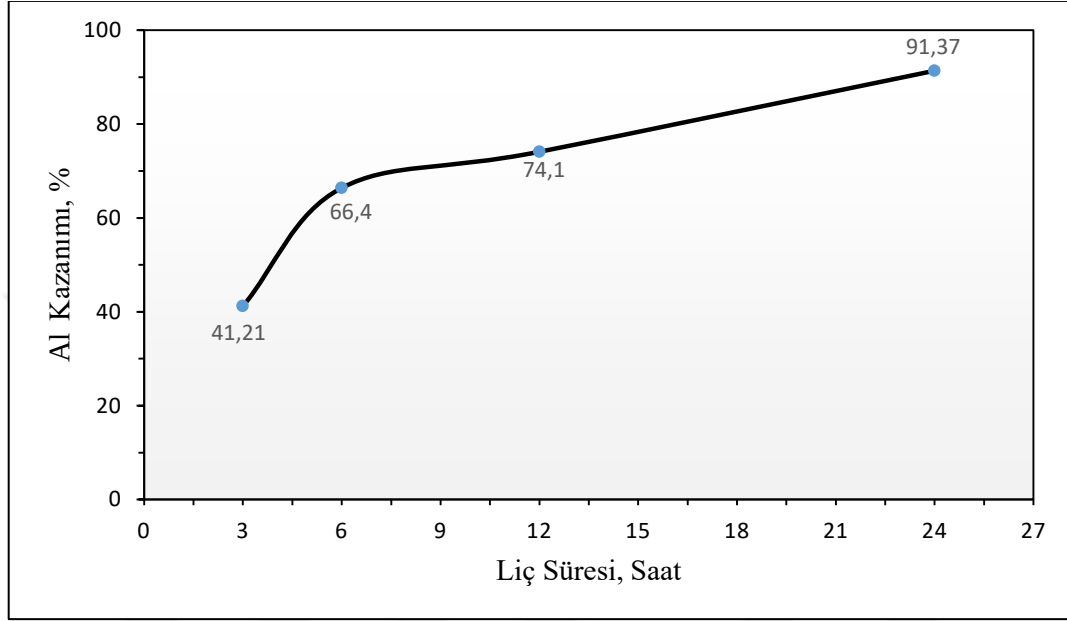
4.3.2. Liç süresi etkisi

Asit türü ve aşırı öğütme süresinin belirlenmesinin ardından çalışılan ikinci parametre liç süresidir. Liç süresi belirleme çalışmaları 60 dk aşırı öğütülmüş pomza örneğinin 3, 12 ve 24 saat HCl ile liçi işlemlerini içermektedir. Asit türü ve aşırı öğütme süresi belirleme çalışmaları sırasında liç süresi 6 saat olarak seçildiğinden ve alüminyum kazanımı sonuçları alındığından bu sürede tekrar liç yapılmamıştır. Yapılan liç çalışmalarından elde edilen Al kazanımları Çizelge 4.8’de görülmektedir.

Çizelge 4.8: Liç süresi çalışmaları sonucunda elde edilen Al kazanımları.

Liç Süresi, saat	Al Kazanımı,%
3	41,21
6	66,40
12	74,10
24	91,37
Liç işlemleri, kaynama sıcaklığında, 20 Ç/K oranında, 600 devir/dk karıştırma hızında ve 4M HCl ile gerçekleştirilmiştir.	

Çizelgeye bakıldığında liç süresi arttıkça Al kazanımının da arttığı görülmektedir. En düşük Al kazanımının 3 saat, en yüksek Al kazanımının ise 24 saat liç sonucunda elde edildiği görülmüştür. Daha sonraki parametrelerin araştırılması sırasında liç 24 saat olacaktır. Al kazanımının liç süresine bağlı değişimi Şekil 4.16’da görülmektedir.



Şekil 4.16: Al kazanımının liç süresine bağlı değişimi.

4.3.3. Asit derişimi etkisi

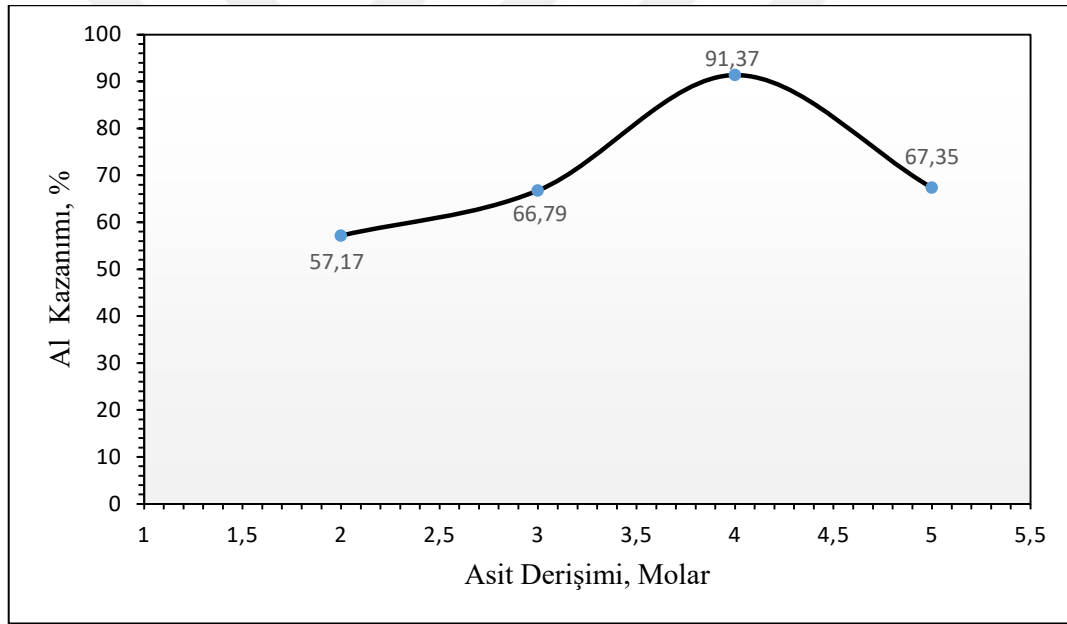
Asit derişimi belirleme çalışmaları kapsamında 60 dk aşırı öğütölmüş pomza örneği 2, 3 ve 5 molar (M) derişimlerdeki HCl ile 24 saat liç işlemine tabi tutulmuş ve asit derişiminin Al kazanımına etkisi incelenmiştir. 4 M asit derişimindeki HCl ile yapılan liç işleminden elde edilen alüminyum kazanımı daha önceden belirlenmiş olduğundan bu asit derişiminde tekrar çalışılmamıştır. İşlemler sonucunda elde edilen alüminyum kazanımları Çizelge 4.9’da görölmektedir.

Çizelge 4.9: Asit derişimi çalışmaları sonucunda elde edilen Al kazanımları.

Asit Derişimi, Molar	Al Kazanımı,%
2	57,17
3	66,79
4	91,37
5	67,35

Liç işlemleri, kaynama sıcaklığında, 20 /K oranında, 600 devir/dk karıştırma hızında ve 24 saat liç süresinde, HCl ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge incelendiğinde en düşük Al kazanımının 2 M asit derişiminde, en yüksek Al kazanım veriminin ise 4 M asit derişiminde elde edildiği görülmüştür. Al kazanımının asit derişimine bağlı değişimi şekil 4.17’de grlmektedir.



şekil 4.17: Al kazanımının asit derişimine bağlı değişimi.

Al kazanımının asit derişimine bağlı değişimi incelendiğinde 4 M asit derişimine kadar Al kazanım veriminin sürekli artış gösterdiği ancak 5 M asit derişiminde tekrar azaldığı grlmektedir. En yüksek Al kazanımının elde edildiği 4 M asit derişiminden sonra artan derişimle birlikte çözeltideki Al^{3+} iyonlarının $AlCl_3$ formuna dönüşerek katılaştığı ve filtrasyon işlemi sırasında atıktaki kaldığı bu nedenle de Al kazanımının azaldığı düşünülmektedir. Böylelikle asit derişimi çalışmaları sonucunda en yüksek verimin alındığı

asit derişimi 4 M olarak belirlendiğinden daha sonraki parametrelerin araştırılması sırasında bu asit derişiminde çalışılacaktır.

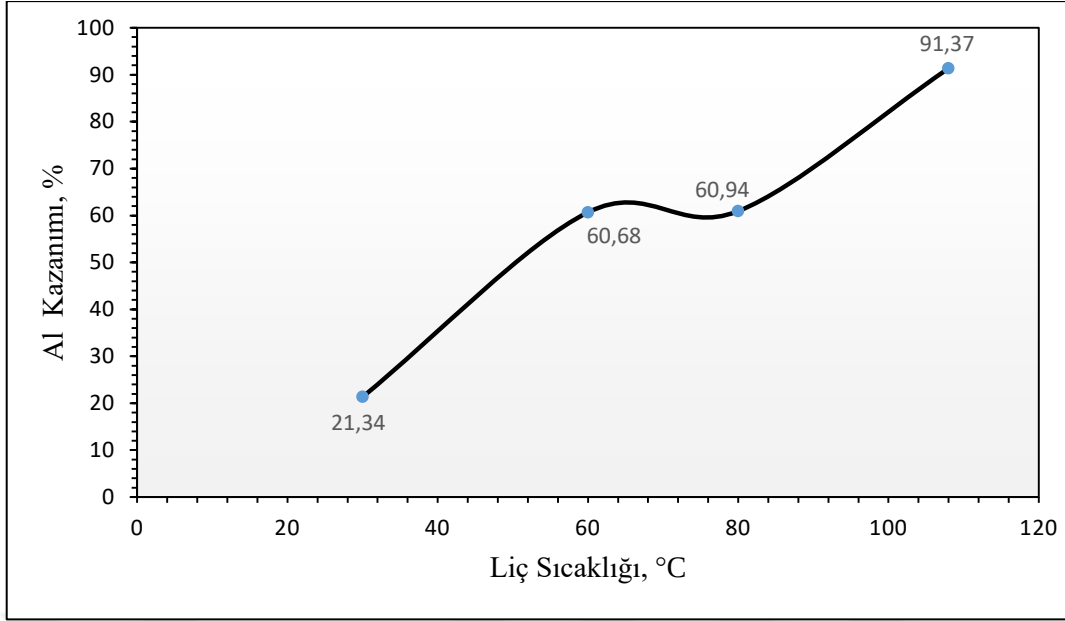
4.3.4. Liç sıcaklığı etkisi

Liç sıcaklığı belirleme çalışmaları kapsamında 30, 60 ve 80 °C sıcaklıklarda daha önce belirlenen liç parametrelerinde çalışmalar yapılmıştır. Daha önce yapılan çalışmalar sırasında liç sıcaklığı olarak kaynama sıcaklığı seçildiğinden bu sıcaklıkta elde edilen Al kazanım verimleri tespit edilmiştir. Bu nedenle kaynama sıcaklığında tekrar liç çalışması yapılmamıştır. Çalışmalar kapsamında elde edilen Al kazanımları Çizelge 4.10'da görölmektedir.

Çizelge 4.10: Liç sıcaklığı çalışmaları sonucunda elde edilen Al kazanımları.

Liç Sıcaklığı, °C	Al Kazanımı, %
30	21,34
60	60,68
80	60,94
K.S.	91,37
Liç işlemleri, 20 Ç/K oranında, 600 devir/dk karıştırma hızında ve 24 saat liç süresinde, 4M HCl ile gerçekleştirilmiştir.	

Çizelge incelendiğinde liç sıcaklığının artmasıyla birlikte Al kazanımının da arttığı görölmektedir. Oda sıcaklığına çok yakın bir sıcaklık olan 30 °C liç sıcaklığında Al kazanım veriminin oldukça düşük olduğu ancak kaynama sıcaklığına çıkıldığında en yüksek Al kazanım veriminin elde edildiği görölmektedir. Bu durumda liç sıcaklığı kaynama sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Alüminyum kazanımının liç sıcaklığına bağlı derişimi Şekil 4.18'de görölmektedir.



Şekil 4.18: Al kazanımının liç sıcaklığına bağlı değişimi

Pomzadan asit liçiyle alümina üretimi çalışmaları kapsamında incelenen son liç parametresi liç sıcaklığıdır. Liç sıcaklığının da tespit edilmesinin ardından pomzadan alümina üretiminde uygulanacak liç parametrelerinin tamamı tespit edilmiş ve asit liçi çalışmaları tamamlanmıştır. Liç çalışmaları sonucunda % 91,37 ile en yüksek Al kazanım veriminin elde edildiği liç koşulları toplu olarak Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.11: Asit liçi çalışmaları sonucunda en yüksek Al kazanımının elde edildiği liç koşulları.

Liç Parametreleri	Belirlenen Değerler
Asit Türü	HCl
Aşırı Öğütme Süresi, dk	60
Liç Süresi, saat	24
Asit Derişimi, molar	4
Liç Sıcaklığı, °C	K.S. (~108)

4.4. AlCl₃ Çöktürmesi için Evaporasyon İşlemi

En yüksek Al kazanımının elde edildiği asit liçi işlemi sonucunda meydana gelen metal yüklü çözeltinin fazla suyu ve asidi buharlaştırılarak alüminyum ve diğer metallerin klorür tuzu formunda çökmesi sağlanmıştır.

4.5. Pomza Alüminası Üretimi için Bozuşturma Kavurması

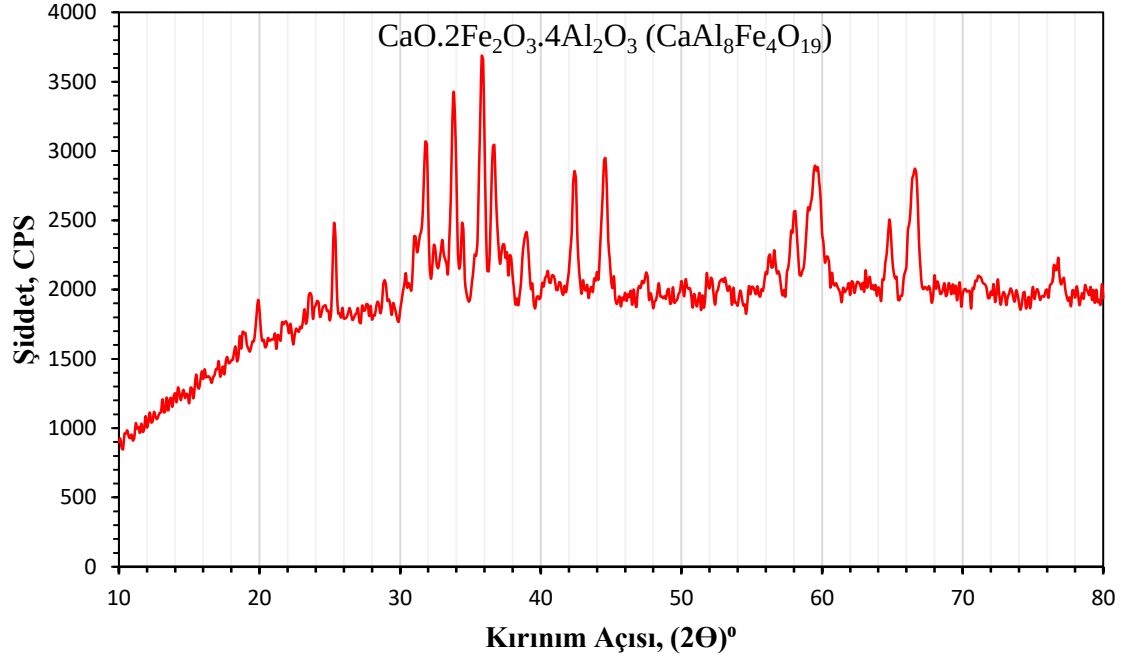
Evaporasyon işlemi ile elde edilen katı 1200 °C sıcaklıkta 3 saat bozuşturma kavurmasına tabi tutulmuş ve pomza alüminası üretilmiştir. Bozuşturma kavurması neticesinde klorür formunda tüp fırına beslenen metaller, oksit formuna bozuşturulmuş ve alümina üretilmiştir. Ancak asit liçi işlemi ile alüminyumun yanında pomza içeriğinde bulunan diğer tüm metaller de çözeltiye alındığından saf bir alümina üretilmemiştir. Pomza alüminasının kimyasal içeriğinin ve kristal yapısının belirlenmesi amaçlarıyla ICP-ES ve XRD analizleri yapılmıştır. Üretilen pomza alüminasının kimyasal içeriği Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.12: Pomza alüminası kimyasal içeriği.

SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	TiO ₂ %	P ₂ O ₅ %	MnO %	Cr ₂ O ₃ %
0,27	62,87	17,54	4,85	11,82	0,09	1,72	0,48	0,31	0,01

Pomza alüminasının kimyasal içeriği incelendiğinde alümina içeriğinde olması istenmeyen Fe₂O₃, MgO ve CaO tenörlerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu şartlarda üretilen alüminanın kalitesinin kabul edilebilir düzeyin çok altında kaldığı görülmüştür. Hali hazırda Bayer Prosesi ile üretilen alüminanın Al₂O₃ tenörünün %99’un üzerinde olduğu düşünüldüğünde pomzadan üretilen alüminanın Al₂O₃ tenörünü arttırmak amacıyla ek işlemler yapılması gerektiği görülmüştür.

Ayrıca kimyasal içerik sonuçlarını desteklemek amacıyla üretilen alüminanın XRD analizi de yapılmıştır. Pomza alüminasının XRD deseni Şekil 4.19’da verilmiştir.



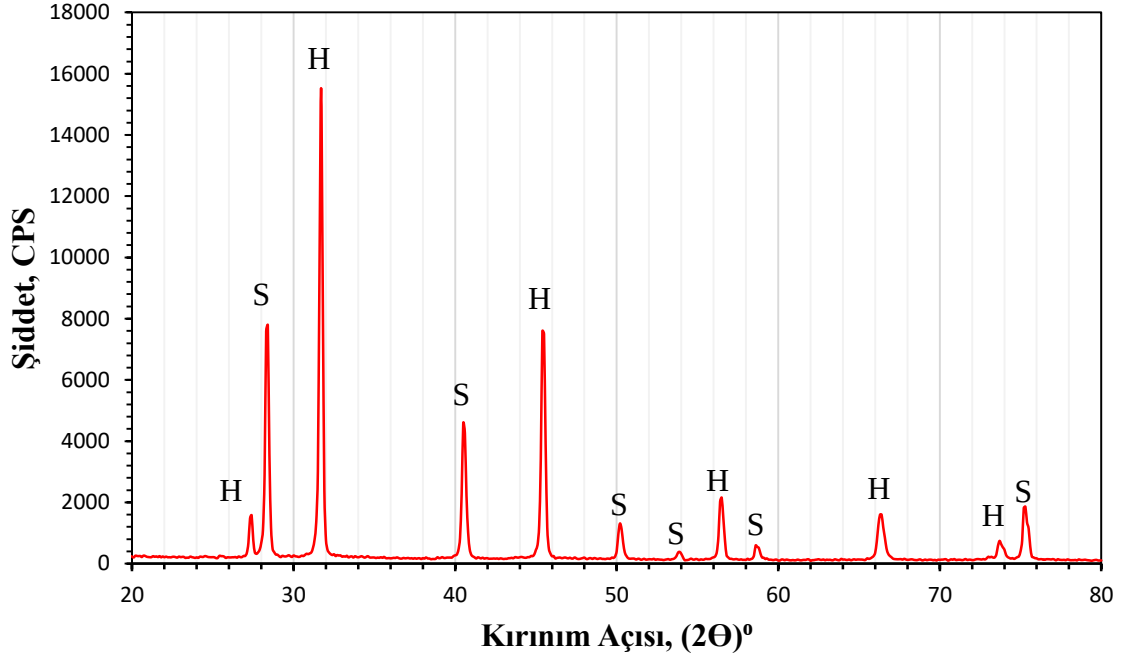
Şekil 4.19: Pomza alüminası XRD deseni.

Pomza alüminasının XRD deseni incelendiğinde tüm piklerin $\text{CaO} \cdot 2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{Al}_2\text{O}_3$ ($\text{CaAl}_8\text{Fe}_4\text{O}_{19}$) biçiminde yazılabilecek tek bir maddeye ait olduğu görülmüştür. XRD deseni ile kimyasal içerik birlikte ele alındığında XRD deseninde tespit edilen kimyasal bileşimin, alüminanın kimyasal içeriği ile örtüştüğü görülmektedir. Üretilen pomza alüminasının görüntüsü Şekil 4.20’de verilmiştir.



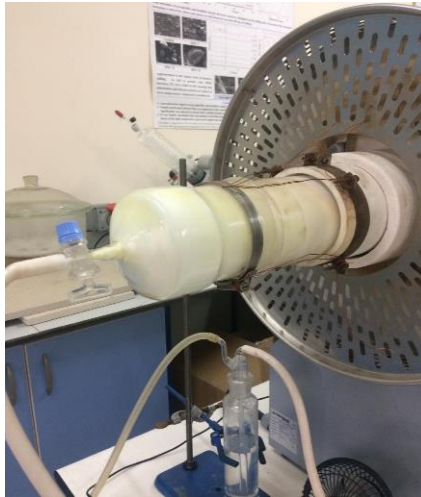
Şekil 4.20: Bozuşturma kavurması sonucu elde edilen pomza alüminası.

Ayrıca bozuşturma kavurması sırasında kuvars tüp çıkışında toplanmış tozlara rastlanmış ve bu tozlar toplanarak XRD analizleri yapılmıştır. Fırın tozlarının XRD deseni Şekil 4.21’de görülmektedir.



Şekil 4.21: Fırın tozları XRD deseni (H: Halit (NaCl), S: Silvit (KCl))

Fırın tozlarının XRD deseni incelendiğinde Halit (NaCl) ve Silvit (KCl) minerallerine ait piklere rastlanmıştır. Ayrıca bu XRD deseni, pomza alüminası içeriğinde K_2O bulunmayışını ve Na_2O tenöründe neredeyse sıfır oluşunun nedenini de açıklar niteliktedir. Bozuşturma kavurması sırasında bu iki uçucu tuzun sıcaklık etkisiyle oksit formuna ulaşmadan klorür formunda fırın çeperinde toplandığı anlaşılmıştır. Böylelikle bozuşturma kavurması sonucunda pomzadan, alüminanın yanında iki ürün daha elde edilmiştir. Fırın çeperinde toplanan Halit ve Silvit minerallerinin görüntüsü Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Fırın çeperinde toplanan Halit ve Silvit içeren toz madde.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Asidik bir volkanik kayaç olan pomzadan, hidrometalurjik yöntemlerle değerlendirilmek suretiyle alümina üretimi olanaklarının ilk kez araştırıldığı bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Talas (Kayseri), Kamber Köyü'nden temin edilen pomza örneğinin karakterizasyon çalışmaları neticesinde; genel olarak amorf yapılı olduğu ancak albit ve anortit minerallerini içerdiği, yüksek poroziteli, düşük özgül ağırlıklı bir yapıya sahip olduğu ve içeriğinde ortalama %14,85 Al_2O_3 bulunduğu tespit edilmiştir.
- Pomzanın farklı sürelerde aşırı öğütülmesiyle tespit edilen tüm minerallerin aşırı öğütme süresine bağlı olarak az ya da çok amorflaştığı, en yüksek amorflaşma ve mekanik aktivasyonun 60 dk aşırı öğütme sonucunda oluştuğu tespit edilmiştir.
- Pomzanın asitte liçi çalışmaları kapsamında; pomza örneği 60 dk aşırı öğütülmüş pomza, asit türü HCl, asit derişimi 4 M, liç süresi 24 saat, liç sıcaklığı 108 °C, çözelti-cevher oranı 20 ml/g, karıştırma hızı 600 dev/dk olarak belirlenmiştir.
- Belirlenen liç koşullarında tüvenan ve 60 dk aşırı öğütülmüş pomza örneğinin asitte liçi sonucunda tüvenan pomzadan Al kazanımı sağlanamamış ancak 60 dk aşırı öğütülmüş pomza örneğinin liçi sonucunda en yüksek %91,37 Al kazanımı elde edilmiştir.
- Aşırı öğütmenin alüminyum kazanımını olumlu yönde etkilediği, öğütme süresi arttıkça, artan amorflaşma derecesine ve özgül yüzey alanına bağlı olarak alüminyum kazanımının da arttığı belirlenmiştir. Ayrıca aşırı öğütme işlemi neticesinde aglomerasyon nedeniyle tane boyutunun arttığı ancak artan tane boyutunun liç verimini olumsuz etkilemediği görülmüştür.
- Tüvenan ve aşırı öğütülmüş pomza örneklerinin yüzey alanı analizleri sonucunda ise tüvenan pomza ile aşırı öğütülmüş pomza örnekleri arasında yüzey alanında anlamlı bir fark olduğu ve yüzey alanının büyüdüğü görülmüştür. Yüzey alanındaki artışında liç verimine olumlu etki yaptığı tespit edilmiştir.
- Aşırı öğütülmüş pomzanın liç atıklarında SiO_2 tenörünün arttığı, Al_2O_3 tenörünün ise azaldığı belirlenmiştir. Aşırı öğütme neticesinde tüm mineraller amorflaşmış ve asitle

çözünebilir hale gelmiş ve bu nedenle pomza içeriğinde bulunan tüm metaller çözeltiye alınmıştır.

- Evaporasyon işlemi ile $AlCl_3$ çöktürülmüş ve çöktürülen $AlCl_3$ bozuşturma kavurmasına tabi tutularak en çok % 62,87 saflıkta alümina üretilmiştir. Alümina saflığının düşük olmasının nedeni demir başta olmak üzere tüvenan pomza içeriğinde diğer metallerinde yüksek tenörlerde bulunması ve bu metallerin asit liçi işlemiyle birlikte çözeltiye geçmesidir.
- Ayrıca tüvenan pomzanın karakterizasyon çalışmaları sırasında pomzanın içerisinde manyetik özellik gösteren bir malzeme tespit edilmiş ve yapılan XRD analizi sonucu malzemenin mineralojik formülü Fe_2TiO_5 olan psödobrokit minerali olduğu tespit edilmiştir. Alümina içerisinde istenmeyen demir ve titanyumun kaynağının psödobrokit olduğu düşünülmektedir.
- Çalışmalar neticesinde 100 ton pomzadan yaklaşık 13,5 ton alümina elde edilebileceği tespit edilmiştir.
- Tez çalışmaları sırasında ortaya çıkan liç atıklarının yaklaşık %90 SiO_2 içerdiği görülmüş ve yapılan çalışmalarda ortaya çıkan hesaplamalar neticesinde 100 ton pomzanın alümina üretimi amacıyla işlenmesi sırasında 70 ton atık meydana geldiği görülmüştür. Gerekli hesaplamalar neticesinde 100 ton pomzada yaklaşık 63 ton SiO_2 bulunduğu görülmüştür.
- Sonuçta bu tez çalışmasında; gerek ülkemizde gerek Dünya’da yüksek rezerve ve düşük maliyete sahip olan pomzadan, katma değeri daha yüksek olan alüminanın üretilabileceği görülmüştür. Ayrıca pomzadan alümina üretimi sürecinde mekanik aktivasyonun ve bununla beraber artan yüzey alanının da olumlu etkileri ortaya çıkarılmıştır.

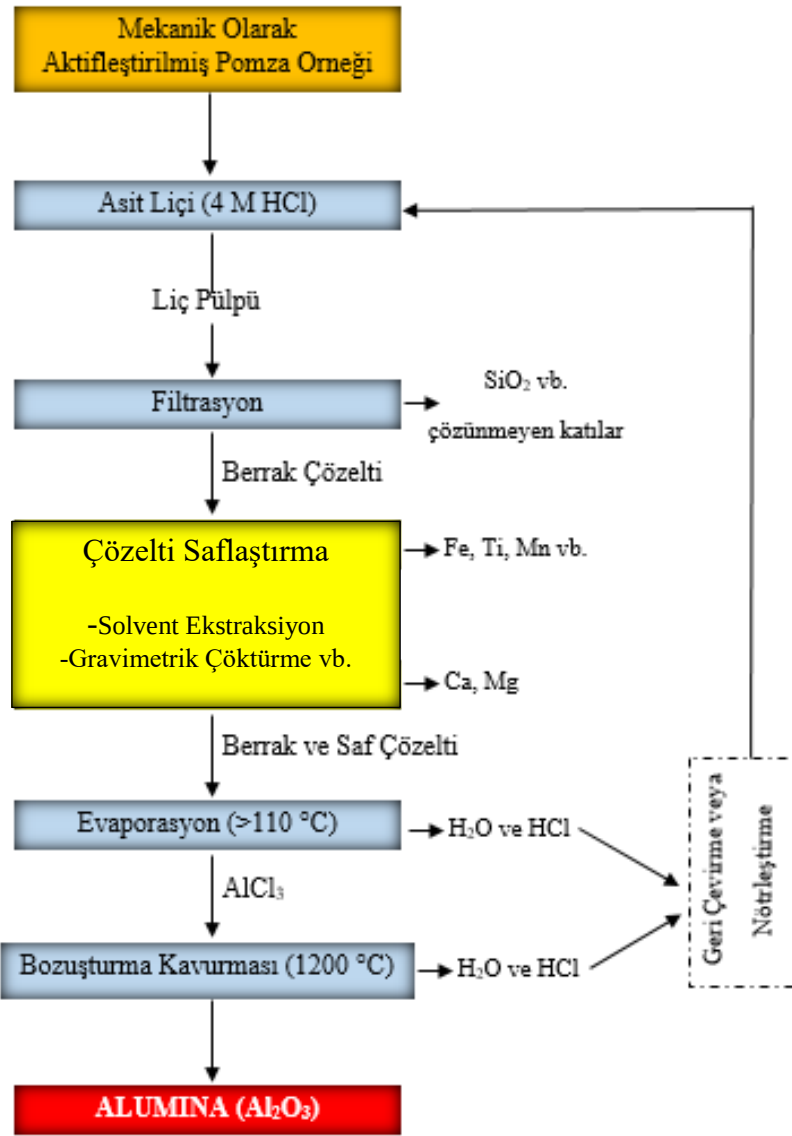
5.2. Öneriler

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçların ileride yapılan çalışmalara yol göstermesi amacıyla aşağıda belirtilen ve bu tezde araştırılmamış olan konuların araştırılabileceği düşünülmektedir.

- Mekanik aktivasyon sonrası asit liçi işlemleri neticesinde alüminyumun yanında pomzada bulunan diğer metallerin de çözeltiye geçtiği ve üretilen alüminanın

saflığını düşürdüğü, bu nedenle alümina içeriğinde istenmeyen bu metallerin çözeltiden uzaklaştırılması gerektiği görülmüştür. Demir uzaklaştırması amacıyla bu tezde uygulanmayan solvent ekstraksiyon yönteminin çözeltide istenmeyen diğer metallerin uzaklaştırmasında kullanılabilirliğinin araştırılabileceği düşünülmektedir.

- Kalsiyum ve magnezyum metallerinin de alümina içerisinde kirlilik oluşturduğu ve bu iki metalinde yine bu tez çalışmasında kullanılmayan analitik kimya metotları (K_2HPO_4 veya NH_4HPO_4 kullanılarak) ile çöktürülerek çözeltiden uzaklaştırılabilecekleri ve bu hususun da araştırılmaya değer olduğu düşünülmektedir.
- Pomzanın karakterizasyonu sırasında tespit edilen Fe_2TiO_5 mineralojik formülüne sahip psödobrokit mineralinin ferromanyetik özelliğinden yararlanılarak hidrometalurji işlemleri öncesi manyetik ayırma yoluyla bu malzemenin pomzadan uzaklaştırılabileceği ve böylelikle alümina içeriğinde kirlilik olarak görülen demir ve titanyumun tamamının veya bir kısmının uzaklaştırılabileceği, öte yandan psödobrokit titanyum minerali olduğundan titanyum üretimi için kullanılabilme olasılığının olduğu ve bu hususların araştırılmaya değer olduğu düşünülmektedir.
- Pomzadan alümina üretiminde bu tez çalışmasında asit liçi yöntemi kullanılmıştır ancak bunun yanında bazik liç yöntemi ile pomzadan alümina eldesi konusunun da çalışılması önerilmektedir.
- Çalışmalar sonucu ortaya çıkan ve yüksek miktarda SiO_2 içeren liç atıklarının değerlendirilmesi amacıyla liç atıklarına alkali ve ardından da asidik liç uygulanarak %99 saflıkta amorf silika üretilebileceği ve bu konunun araştırılmaya değer olduğu düşünülmektedir.
- Pomzadan alümina üretiminde bu tez çalışması kapsamında aşağıdaki akım şeması önerilmektedir.



Şekil 5.1: Pomzadan alümina üretimi için önerilen akım şeması

KAYNAKLAR

- Akçay, M., Apaydın, F. (2017). Malahit Cevherinin Amonyum Nitrat ile Liç Edilmesine Mekanik Aktivasyonun Etkisinin İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17, 717-726.
- Akçıl, A., Çiftçi, H. (2006). Bakteriyel Liç Mekanizmaları. *Madencilik*, 45(4), 19-27.
- Aksoy, E. (2010). *Isparta gelincik pomza yataklarının jeolojisi, fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya
- Anderson, J. S., Richie, M. I. (1968). Solution Mining of Uranium. *Mining Congress Journal*, 54(1), 20-26.
- Anonim.(2020a). https://mapeg.gov.tr/maaden_istatistik.aspx Son Erişim Tarihi: 21.05.2021
- Anonim. (2020b). mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/2011-maden-ihracat-degerleri Son Erişim Tarihi: 21.05.2021
- Anonim. (2021a). <http://talsad.org.tr/wp-content/uploads/files/dunya-aluminyum-sektoru-ve-turkiye-talsad-alus08-2017.pdf> Son Erişim Tarihi: 21.05.2021
- Anonim. (2021b). <https://www.world-aluminium.org/statistics/alumina-production/#data> Son Erişim Tarihi: 21.05.2021
- Anonim. (2021c). <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/pomza> Son Erişim Tarihi: 21.05.2021
- Anonim. (2021d). <https://cgis.ca/article-hydrometallurgy-valves/> Son Erişim Tarihi: 21.05.2021
- Apaydın, S. H. (2018). *Zirkonya Takviyeli Alümina Esaslı Seramik Malzemelerin Üretimi ve Karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi. Samsun
- Arık, H. (2009). Ekstraktif Metalurji Ders Notları. Ankara: Gazi Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü.
- Aydoğmuş, R. (2019). *Zenginleştirilmiş Malatya-Pütürge Pirofillit Cevherinin Alümina Üretimi İçin Aktifleştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Ayna Çakır, C. (2019). *Kordiyerit Esaslı Seramiklerin Korozyon Direncine Mekanik Aktivasyonun Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi. Sakarya
- Azis, A. (1976). A computer Simulation Model for the Assesment of Mineral Resources. (s. 1182-1196). 14 th APCOM Symposium.
- Balaz, P. (2000). Extractive Metallurgy of Activated Minerals. Amsterdam: Elsevier.
- Baş, A. D., Yazıcı, E. Y., & Celep, O. (2014). Geçmişten Günümüze Hidrometalurji. *Yer Altı Kaynakları Dergisi*, 3(5), 39-50.
- Biangardi, S., Pietsch, H. (1976). Verarbeitung sulfidischer Kupfererze nach dem Lurgi-Mitterberg (LM)-Verfahren. *Erzmetal*, 29, 73-80.

- Boldyrev, V. V., Pavlov, E. L., Goldberg, E. L. (1996). Interrelation between fine grinding and mechanical activation. *International Journal of Mineral Processing*, 44, 181-185.
- Butyagin, P. Y. (1973). Primary active centers in mechanochemical reactions. *Zurnal Vsesojuznogo Chimiceskogo obs ecestva D. Mendelejeva*, 18, 90-95.
- Canbazoglu, M., Uzun, M., Çelik, Ö., Köse, M. (1985). Küre Piritli Bakır Cevherlerinden Kobalt, Bakır, Altın ve Gümüşün Hidrometalurjik Süreçlerle Kazanılma Olanakları. 9. Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik Kongresi, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara.
- Corrans, I. J., Angove, J. E., Johnson, G. D. (1995). The treatment of refractory coppergold ores using Activox® processing. In *Proceedings of International Conference on "Randol Gold Forum"*, (s. 221-224). Perth.
- Çiçekli, A. G. (2013). *Küre/Kastamonu Bakırlı Pirit Cevherinden Azotlu Bileşiklerle Katalizlenmiş Oksidatif Basınç Liçi İle Bakırın Kazanımının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir
- Çılgı, G., Çetişli, H. (2009). Thermal decomposition kinetics of aluminum sulfate hydrate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 98(3), 855-861.
- Davraz, M., Gündüz, L. (1997). Isparta Yöresi Pomza Taşının Hafif Yapı Elemanı Olarak Değerlendirilmesi Üzerine Bir Analiz. 1. *Isparta Pomza Sempozyumu*, (s. 61-70).
- Değerli, S. (2002). *Bayer Prosesinin Ara Atık Ürünü Olan Alüminyum Hidroksit Kabuğundan Aktif Alümina Eldesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Demir, G. K. (2017). *Bayer Prosesine Kireç Kullanımının Etkisinin Araştırılması ve Eti Alüminyum Tesislerinde Uygulamaları*. Yüksek Lisans Tezi. Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya
- Demirel, N. (2020). *Lateritik Cevherlerde Atmosferik Liç Verimini Artırmaya Yönelik Yöntem Geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara
- Demirel, S. (2011). *Rize Bölgesi Bakır Cevherlerinden Bakır Kazanımına Mekanik Aktivasyonun Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya
- Demirel, S., Kartal, M., Uysal, M., Alp, A., Gül, H. (2017). Mekanik aktivasyon süresi ve katı-bılye oranının Çayeli sülfürlü bakır konsantresi üzerindeki etkisinin incelenmesi. *Published in 5th International Symposium on Innovative Technologies in. Baku-Azerbaijan*.
- Diñer, İ., Orhan, A., Çoban, S. (2015). *Pomza Araştırma ve Uygulama Merkezi Fizibilite Raporu*. Nevşehir: Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi.
- Dombaycı, A. (2007). *Alümina-Spinel-Zirkonya ile Çimentosuz Kendi Kendine Akabilen Dökülebilir Refrakter Geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Dutrizac, J. E., MacDonald, R. C. (1974). Ferric ion as a leaching medium. *Minerals Science and Engineering*, 6(2), 59-95.
- Ellis, S., Gao, M. (2002). Development of ultrafine grinding at Kalgoorlie Consolidated Gold Mines. Arizona: Society of Mining Engineers 2002 Annual Meeting.

- Elmastaş, N. (2012). Türkiye İçin Önemi Giderek Artan Bir Maden: Pomza (Sünger Taşı). *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 5(23), 198-206.
- El-Shereafy, E. (1998). Mechanism of thermal decomposition and γ -pyrolysis of aluminum nitrate nonahydrate ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$). *Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 237, 183-186.
- Ercenk, G. (2008). *Mekanik Olarak Aktive Edilen Alunitin Sülfirik Asit Çözeltisinde Liç Kinetiği*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Erdemoğlu, M., Birinci, M., Uysal, T. (2018). Kil minerallerinden alümina üretimi: güncel değerlendirmeler. *Politeknik Dergisi*, 21(2), 387-396.
- Ersoy, B., Sariisik, A., Dikmen, S., Sariisik, G. (2010). Characterization of acidic pumice and determination of its electrokinetic properties in water. *Powder Technology*, 197(1-2), 129-135.
- Fowler, T. A., Holmes, P. R., Crundwell, F. K. (2001). On the Kinetics and Mechanism of the Dissolution of Pyrite in the Presence of *Thiobacillus ferrooxidans*. *Hydrometallurgy*, 59, 257-270.
- Gaffet, E. (1999). Some recent developments in mechanical activation and mechanosynthesis. *Journal of materials chemistry*, 9(1), 305-314.
- Girgin, İ. (1984). Boksit Dışı Kaynaklardan Alümina Üretimi. *Madencilik*, 23(3), 7-14.
- Girgin, İ. (1989). Düşük tenörlü cevherlerden yığın liçi yöntemiyle altın ve gümüş kazanımı. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 28(1), 35-40.
- Girgin, İ., Baser, F. (1990). Yerinde Liç Uygulamaları ve Tenör-Tonaj İlişkisi. *Madencilik*, 30(2), 27-31.
- Girgin, İ., Kırşan, H. (1990). Yığın Liçi Uygulamaları ve Ekonomik Açıdan Önemi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 29(3), 39-43.
- Gökçe, H., Can, Ö. (2009). Pomza Agregasının Farklı Zamanlardaki Su Emmelerinin Hafif Betonun Mekanik ve Fiziksel Özelliklerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 12(4), 293-298.
- Göktaş, M. (2018). Cevher Hazırlamada Mekanik Aktivasyon Uygulamaları. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 57(1), 57-66.
- Gündüz, L., Şapçı, N. (2005). Pomza Madenciliği, Endüstrisi ve Türkiye Açısından Önemi (Gelişen Yeni Bir Sektör). *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*. İzmir.
- Güngör, N., Tombul, M. (1997). Pomzanın Kullanım Alanı ile İlgili Özellikleri ve Mevzuatın Pomza Madenciliğine Etkisi. *Isparta Pomza Sempozyumu*, 26-28.
- Habashi, F. (1970). *Principles of extractive metallurgy*, New York: Gordon and Breach Science Publishers.
- Habashi, F. (1997). *Handbook of extractive metallurgy*. (2nd ed.). New York: Wiley-Vch.
- Hart, L. D. (1990). History of alumina chemicals. *Alumina Chemicals: science and technology handbook*, Columbus: American Ceramic Society.

- Hartman, M., Trnka, O., Solcova, O. (2005). Thermal decomposition of aluminum chloride hexahydrate. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(17), 6591-6598.
- Heinen, H. J. (1980). percolation leaching of clayey gold-silver ores. Nevada: Nevada bureau of mines and geology.
- Hossain, K. (2004). Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 283-291.
- İlter, O. (2010). *Use of Pumice in Mortar and Rendering for Lightweight Building Blocks*. Master Thesis, Eastern Mediterranean University, Gazimağusa, North Cyprus.
- Juhasz, A. Z. (1974). Mechanochemische Aktivierung von Silikatmineralen durch Trocken-Feinmahlen. *Aufbereitungs-Technik*, 10, 558-562.
- Kappes, D. W. (2005). Heap Leaching of Gold and Silver ores. *Advances in Gold Ore Processing*, 15, 456-479.
- Karabay, D. (2006). *Değişik oranlarda pomza, talk ve serpantin ilavelerinin fayans mase üzerine etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
- Kılınç Aksay, E. (2005). *İzmir-Menderes yöresi pomza cevherinin kullanımına yönelik teknolojik özelliklerinin araştırılması*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Kılınç Aksay, E., Akar, A., Cöcen, İ. (2016). Pomza Cevherinin Hazırlanması ve Zenginleştirilmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 384-390.
- Kökeş, H. (2013). *Oksitli Bakır Cevherlerinden Hidrometalurjik Yöntemle Bakır Sülfat Kristalleri Üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Madona, M. (1999). Alumina Raw Materials for the Refractory Industry. *CN-Refractories*, 6(3), 54-63.
- Marrs, L. M. (1970). Underground Leaching of Uranium at the Pitch Mine. *Mining Congress Journal*, 56(11), 35-43.
- Orhan, A., Dinçer, İ., Akın, M., & Çoban, S. (2017). Nevşehir Pomza Endüstrisi'nin Genel Değerlendirilmesi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(2), 571-579.
- Önal, G. (1985). Cevher Hazırlamada Flotasyon Dışındaki Zenginleştirme Yöntemleri. *İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Ofset Atölyesi*, 2.
- Özboz, F. (2017). *Rize Bölgesi Kompleks Sülfürlü Bakır Cevherlerinin Anodik Oksitleme Yöntemi İle Liçi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Özer, M. (2012). *Renkli Metal İçeren Kompleks Sülfürlü Yapıdaki Hammaddelerin Kavrulma Karakteristiklerinin Belirlenmesi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Park, K. Y., Jeong, J. (1996). Manufacture of low-soda alumina from clay. *Industrial&Engineering Chemistry Research*, 35(11), 4379-4385.
- Pierce, T. (1928). *Mechanochemistry and the colloid mill including the practical applications of fine dispersion*. Chemical Catalog Company, New York, 191 p.

- Rashidi, A. (2020). *Yığın Liçi İle Altın (Au) Kazanımında Yığın Özelliklerinin İyileştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak.
- Sarıdede, M. N., Birol, B. (2005). Özel Alüminalar-1, Kalsine Alüminalar. *Metalurji*, 141, 167-174.
- Sarıkaya, S. (2018). *Bir Altın Cevherinde Başlıca İşlem Parametrelerinin Liç Verimine Etkilerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Silverman, M. P. (1967). "Mechanism of Bacterial Pyrite Oxidation. *J. Bacterial*, 94, 1046-1051.
- Smekal, A. (1942). Ritzvorgang und molekulare Festigkeit. *Naturwissenschaften*, 30, 224-225.
- Şahin , G. (2006). *Homojen Çöktürme Yöntemi ile Alümina Üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Şahiner, M., Eroğlu, G. (2020). *Dünyada ve Türkiye'de Pomza*. Ankara: MTA, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı.
- Şener, M. (2012). *Mekanik Aktivasyonun Jipsin ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) Isıl Davranışına Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Şener, M., Erdemoğlu, M. (2014). Jipsin Isıl Davranışına Mekanik Aktivasyonun Etkisi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 53(4), 19-26.
- Tanaydın, M. K. (2018). *Hidrometalurjik Yöntemlerin Uygulanmasıyla Malahit Cevherinden Metalik Bakır Üretilmesinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Terzier, F. (2011). *Yerli Kaynaklardan Reaktif Alümina Üretimi ve Karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar
- Torma, A. E. (1977). The Role of Thiobacillus ferrooxidans in Hydrometallurgical Processes. *Adv. Biochem*, 6, 1-37.
- Tromans, D., Meech, J. A. (1999). Enhanced Dissolution of Minerals: Microtopography and Mechanical Activation. *Minerals Engineering*, 12(6), 609-625.
- Tuncer, G., Özkan, Ş. G. (2001). Pomza Madencilğine Genel Bir Bakış. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 269-276.
- Turan, D. (2021). Mekanik Olarak Aktive Edilmiş Kırmızı Çamurdan Değerli Metallerin Geri Kazanılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(1), 63-69.
- Ulu, S. (2019). *Küre Bölgesi Kompleks Sülfürlü Bakır Cevherlerinin Hidrometalurjik Proseslerle Değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Umucu, Y. (2004). *Isparta-Karakaya yöresi pomza yataklarının gravite ile zenginleştirme olanaklarının araştırılması ve tesis simülasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Uysal, T. (2018). *Asit Liç Yöntemi İle Pirofillit Cevherinden Alümina Üretiminde Aktifleştirme Koşullarının Araştırılması*. Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.

- Ünal, O., Demir, İ., Uygunoğlu, T. (2003). Pomza Ve Diyatomitin Hafif Blok Eleman Üretiminde Kullanılmasının Araştırılması. 3. *Ulusal Kırmataş Sempozyumu* (s. 3-4). İstanbul: Maden Mühendisleri Odası.
- Varol, O. O. (2016). Bitlis ve Van İllerinde Pomza Madenciliğine Genel Bir Bakış. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 55(3), 27-34.
- Vivienne , L., Peter , R., Fred, M. (1989). Peroxide addition improves gold recovery and saves reagents at Pine Creek Gold Mine. Colorado: Randol Gold Conference.
- White, L. (1975). In Situ Leaching Opens New Uranium Reserves in Texas. *Engineering and Mining Journal*, 17657, 73-81.
- Yanık, S. (2007). *Bazaltik Pomzaların Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliği*. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana
- Yarkadaş, G. (2010). *Kromitten Sodyum Kromat Üretimine Mekanik Aktivasyonun Etkisinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Yıldız, K. (2010). Mekanik Aktive Edilmiş Karbonatlı Mangan Cevherinin Sülfirik Asit Liçi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 14(1), 50-54.
- Yıldız, K., Alp, A. (2005). Metalurjik proseslerde mekanik aktivasyon. *Metal Dünyası*, 146, 119-121.
- Yıldız, K., Dorum, A., Koçak, Y. (2010). Pomza Zeolit Ve Cem I Çimentosunun Minerolojik Moleküler Elektrokinetik Ve Termal Uyumunun Yüksek Dayanımlı Betona Etkisinin Araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(2).
- Yüksel, E., (2018). *Perlit Ve Pomzadan Üretilen Filtrelerin İş Partikülleri Üzerine Etkisinin Deneyisel Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi, Bitlis
- Yürüyen, S. (2011). *Talk-Kaolen-Alümina Seramik Sisteminde Kordiyerit Oluşumuna Mekanik Aktivasyonun Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Yürüyen, S., Toplan , N., Yıldız , K., Toplan, H. Ö. (2014). Talk-Kaolen-Alumina Seramik Sisteminde Kordiyerit Oluşumuna Mekanik Aktivasyonun Etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14, 37-40.
- Yüzer, H., Hasanova, S., Köroğlu , H. J. (1995). Seydişehir Gibsit Orijinli, Kabuktan Aktif Alüminalı Adsorban Eldesi. 8. *Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi* (s. 923-928). İstanbul: TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Muhammed Kürşat AYDEMİR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** :2018, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2021, İnönü Üniversitesi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM:

- Nisan-Temmuz (4 ay) 2019 yılında Orak Nakliyat Tic. Ltd. Şti.'de çalıştı.
- Temmuz-Ekim (4 ay) 2019 yılında Türkmag Madencilik A.Ş.'de çalıştı.