İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK HURDA ve BASKI DEVRELERİNDEN METAL GERİ KAZANIMINA YÖNELİK ÖN İŞLEMLER VE PROSES OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji Müh. Murat ESKİCİ
(506031206)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 8 Mayıs 2006

Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Haziran 2006

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Servet TİMUR
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Cüneyt ARSLAN (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Fatma ARSLAN (İ.T.Ü.)

HAZİRAN 2006

ÖNSÖZ

Hayatım boyunca hep birden fazla hedef belirledim kendime. Bu hedeflerden birinden tökezlersem yılmak yok, diğer tarafta alternatifi var dedim. Çok yolda yürümek kimi zaman çok yordu ama başardıkça da bir o kadar mutlu etti.

Yüksek lisans tezimin her aşamasında bana yardımcı olan, sorunlarım karşısında çözümü söylemek yerine çözüme nasıl ulaşacağımı gösteren ve bendeki araştırma duygusunu körükleyen, kimi zaman yaptığım tahammül edilemez yanlışlarımda bile sabreden yüksek mühendis apoletinin kolay kazanılamayacağını bana öğreten, hocam Prof. Dr. Servet TİMUR'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu tez çalışması süresince benden yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmamda yeni birini tanıdım!. Adı Aybars GÜVEN. Lisans dönemim boyunca onu zaten biliyordum fakat yüksek lisansta onunla o kadar çok şey paylaştım ki şunu anladım, bir abim olsa sanırım bu kadar olurdu. Yüksek lisansım boyunca yanımdan hiç ayrılmayan, bana her defasında yardımcı olan, sabahlara kadar benimle uğraşan, yeri geldiğinde kızan hemde harbiden kızan, kendime örnek aldığım abime çok ama çok teşkkür ederim. Abi senin kardeşin yoktu benimde abim eğer kabul edersen kardeşin olmak istiyorum..Bu arada kızılcık sopan hazır abi..

Her zaman bana gösterdiği destek ve verdiği moral için arkadaşlarım Barış ERDEM'e ve Alican ERSİN'e teşekkür ederim. Analizlerimi yapan İnci KOL'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans tezim süresince benden desteklerini esirgemeyen işyerinden çalışma arkadaşım İhsan Yasin BEZER'e, fırın yapımında yardımlarını esirgemeyen Mahmut USTA'ma ve diğer işyeri arkadaşlarıma teşekkür ederim..

Kimi zaman tez çalışmam nedeniyle eve bir hafta boyunca sadece yatmaya geldim veya hiç gelemedim. Onları eve geldiğim zamanlarda da çok az gördüm. Ama onların bana olan desteklerini hep hissettim.Onlar kim mi? AİLEM..”Oğlum napıyorsun,iyimisin” diye telefonla arayan BABAMA, sabahları evden çıkarken arkamdan dualarını eksik etmeyen ANNEME, Kocaeli üniversitesinde hukuk okuyan, her daim özlediğim KARDEŞİME ve her türlü stresimi çeken zor günlerimde yanımda olan özelim Aybike KOVULMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs, 2006 Met. Müh. Murat ESKİCİ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ii
ŞEKİL LİSTESİ vii
ÖZET ix
SUMMARY x
1. GİRİŞ 1

2. GENEL DEĞERLENDİRME 2

2.1. Elektrik ve Elektronik Ekipman Hurdalarının Kimyasal Bileşimi 4
2.2. Elektrik ve Elektronik Ekipman Hurdalarının Fiziksel Karakterizasyonu 6
2.2.1. Yoğunluk Özellikleri 6
2.2.2. Partikül Boyutu Özellikleri 7
2.3. Elektrik ve Elektronik Ekipman Hurdalarının Geri Kazanımı ve Faydaları 8
2.3.1. Baskı Devrelerinin Geri Kazanılması 8
2.3.1.1. Hidrometalurjik Geri Kazanım Yöntemi 8
2.3.1.2. Pirometalurjik Geri Kazanım Yöntemi 9
2.3.1.3. Elektrometalurjik Geri Kazanım Yöntemi 9
2.3.1.4. Biyokimyasal Geri Kazanım Yöntemi 9
2.3.2. Ekonomik Faydaları 9
2.3.3.ÇevreselFaydaları 11

3. ELEKTRONİK HURDALARIN ANA BİLEŞENLERİNDEN BASKI DEVRELERİ VE GERİ KAZANIMLARI 13

3.1. Elektronik Sanayinde ve Elektronik cihazlarda Baskı Devrelerinin Kullanım Alanları 13
3.2. Baskı Devrelerinin Fiziksel Karakterizasyonu 14
3.3. Baskı Devrelerinin Bileşimi 15
3.4. Mekanik ve Fiziksel Geri Dönüşüm Prosesi 17
3.4.1. Demontaj 17
3.4.2. Lehim Sökme İşlemi 18
3.4.3. Kırma İşlemi 20
3.4.4. Eleme İşlemi 20
3.4.5. Manyetik Ayırım 21
3.4.6. Yoğunluk Ayırımı 22

4. KONUYLA İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR 24

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 30

5.1. Deneylerde Kullanılan Başlangıç Malzemeleri 30
5.2. Baskı Devresi Deneyleri 30
5.2.1. Deneylerde Kullanılan Cihazlar 32
5.2.2. Yapılan İşlemler 35
5.2.2.1. Demontaj 35
5.2.2.2. Lehim Sökme İşlemi 35
5.2.2.3. Kırma İşlemi 36
5.2.2.4. Öğütme İşlemi 36
5.2.2.5. Manyetik Ayırma İşlemi 37
5.2.2.6. Elek Analizi 37
5.2.2.7. Yoğunluk farkına göre ayırım 37
5.3. İşlemci Deneyleri 38
5.3.1. Öğütme Deneyi 38
5.3.2. Manyetik Ayırma İşlemi 38
5.3.3. Elek Analizi 39

6. DENEY SONUÇLARI VE İRDELEMELER 40

6.1. Baskı Devreleri Deney Sonuçları ve İrdelemeleri 40
6.1.1. Demontaj İşlemi Sonuçları 40
6.1.2. Lehim Sökme İşlemi Deney Sonuçları 40
6.1.3. Kırma İşlemi Deney Sonuçları 42
6.1.4. Öğütme İşlemi 42
6.1.5. Manyetik Ayırma İşlemi Deney Sonuçları 43
6.1.6. Elek Analizi Deney Sonuçları 43
6.1.7. Yoğunluk Farkına Göre Ayırma Deney Sonuçları 49
6.2. İşlemci Deney Sonuçları 50
6.2.1. Öğütme İşlemi Deney Sonuçları 50
6.2.2. Manyetik Ayırma İşlemi Deney Sonuçları 51
6.2.3. Elek Analizi Deney Sonuçları 51

7. GENEL SONUÇLAR 53

KAYNAKLAR 56

ÖZGEÇMİŞ 58

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Elektrik ve elektronik ekipman hurdalarındaki önemli zararlı bileşenler. 5

Tablo 2.2: Elektrik ve Elektronik ekipmanlarda kullanılan metallerin yoğunlukları . 6

Tablo 2.3: Ton elektronik hurdadan elde edilen gelir tablosu 10

Tablo 2.4: Elektronik hurdalarda bulunan zararlı maddeler 11

Tablo 3.1: Baskı devrelerini oluşturan metalik değerlerin oranları ve kullanım yerleri 16

Tablo 3.2: Baskı devrelerinde bulunan bazı kimyasal bileşikler 16

Tablo 3.3: Yoğunluk Farkına Göre Ayırma yöntemleri..... 23

Tablo 5.1: Sıcaklık ve zamana göre baskı devresindeki lehim miktarında meydana gelen değişim 36

Tablo 5.2: Tablo 5.2. Baskı devrelerine uygulanan öğütme süreleri 37

Tablo 6.1: Demontaj öncesi ve sonrası ağırlık değişimi 40

Tablo 6.2: Lehim Sökme İşlemi Sonucunda Elde Edilen Değerler 40

Tablo 6.3: Sıcaklık ve zamana göre baskı devresindeki lehim miktarında meydana gelen değişim 41

Tablo 6.4: Fırına sokulan bir baskı devresinin ağırlık dağılımı 42

Tablo 6.5: Zamana bağlı Manyetik Ayırma Deney Sonuçları 43

Tablo 6.6: Tamamı 15 sn süresince 5 mm Altına Öğütülmüş Numunenin Elek Analizi Sonuçları..... 44

Tablo 6.7: Tamamı 30 sn süresince 5 mm Altına Öğütülmüş Numunenin Elek Analizi Sonuçları..... 45

Tablo 6.8: Tamamı 60 sn süresince 5 mm Altına Öğütülmüş Numunenin Elek Analizi Sonuçları..... 46

Tablo 6.9: Tamamı 90 sn süresince 5 mm Altına Öğütülmüş Numunenin Elek Analizi Sonuçları..... 47

Tablo 6.10: Tamamı 120 sn süresince 5 mm Altına Öğütülmüş Numunenin Elek Analizi Sonuçları..... 48

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: 2002 yılında IBM'nin toplam elektronik hurda dağılımı 4

Şekil 2.2: Elektronik hurdaların bileşenlerine göre dağılımı 4

Şekil 2.3: Bilgisayar hurdalarındaki tane boyutuna bağlı metal dağılımı 7

Şekil 2.4: 1 Ton elektronik hurdadan elde edilecek gelir dağılımı 10

Şekil 3.1: Baskı Devrelerin Elektronik Teknolojisindeki Kullanım Alanları 14

Şekil 3.2: Baskı devrelerin geri kazanımı için geliştirilen lehim sökme fırını 18

Şekil 3.3: Geliştirilen Merdaneli Tip Öğütücü 20

Şekil 4.1: Daimler-Benz Yöntemi 25

Şekil 4.2: HERAUS' un soy metal geri dönüşümü 28

Şekil 5.1: Baskılı devrelere uygulanan işlem adımları 31

Şekil 5.2: Fırın Yapım aşaması fotoğrafları 32

Şekil 5.3: Fırındaki konveyör sisteminin teknik çizimi 33

Şekil 5.4: Fırının bitmiş haldeki fotoğrafları 34

Şekil 5.5: Kırma makinesinin ve bıçaklarının fotoğrafları 34

Şekil 5.6: 4 dak. lık ferro silikon numunesine uygulanan partikül analizi sonucunda ortaya çıkan tane boyutu dağılımı 38

Şekil 6.1: Sıcaklık ve zamana göre baskı devresindeki lehim miktarında meydana gelen % değişim 41

Şekil 6.2: Baskı devrelerinde öğütme zamanına göre manyetik-manyetik olmayan kısım dağılımı 43

Şekil 6.3: 15 sn süresince öğütme işlemi uygulanan baskı devresinin elek analizi sonucundaki tane boyutu dağılımı 44

Şekil 6.4: 30 sn süresince öğütme işlemi uygulanan baskı devresinin elek analizi sonucundaki tane boyutu dağılımı 45

Şekil 6.5: 60 sn süresince öğütme işlemi uygulanan baskı devresinin elek analizi sonucundaki tane boyutu dağılımı 46

Şekil 6.6: 90 sn süresince öğütme işlemi uygulanan baskı devresinin elek analizi sonucundaki tane boyutu dağılımı 47

Şekil 6.7: 120 sn süresince öğütme işlemi uygulanan baskı devresinin elek analizi sonucundaki tane boyutu dağılımı 48

Şekil 7.1: Bir Bilgisayar Kasasının Ağırlık Dağılımı 54

ELEKTRONİK HURDA ve BASKI DEVRELERİNDEN METAL GERİ KAZANIMINA YÖNELİK ÖN İŞLEMLER VE PROSES OPTİMİZASYONU

ÖZET

Elektrik ve elektronik teknolojisi modernleşme sürecine paralel olarak çok hızlı gelişmektedir. Bu büyüme sonucunda artan cihaz kullanımı ve azalan ekonomik ömür paralelinde önemli miktarda elektronik hurda açığa çıkmaktadır.

Elektrik ve elektronik hurdaları yüksek miktarlarda değerli metal içerdiğinden ve günümüzde cevherden metal üretmenin iyice zorlaştığı göz önüne alındığında elektronik hurdaların geri dönüşümü daha da önem kazanmakta ve kaçınılmaz hale gelmektedir.

Elektronik hurdalar %30 plastik, % 30 Refrakter oksitler, % 40 metalden meydana gelmektedir. Plastiklerin büyük bir kısmını polyolefinler, polyesterler ve polikarbonatlar oluşturmaktadır. Metaller, ana metaller ve soy metaller olmak üzere iki sınıfta incelenebilir. Toplam hurdanın % 40' ını oluşturan ana metaller bakır (% 20), demir (% 8), kalay (% 4), nikel (% 2), kurşun (% 2), alüminyum (% 2) ve çinkodur (% 1). Soy metaller ise altın (% 1), gümüş (% 0,2) ve paladyumdur (% 0,005)

Bu çalışmada baskı devreleri ve özellikle bilgisayar işlemciler kullanılarak baskı devrelerinin geri dönüşümüne yönelik elektronik parçaların demontajı, lehimin ayrılması, baskı devrelerinin kırılması, öğütülmesi, manyetik ayırma ve yoğunluk farkına göre ayrım gibi ön işlemler incelenmiştir. İşlemcilerin geri dönüşümüne yönelik ise öğütme, manyetik ayırma işlemleri uygulanmıştır. Tekrarlı deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

Lehim alma işlemi için optimum sıcaklık aralığı 200-220 ^{o}C olarak belirlenmiştir.

Kimyasal analiz sonucunda işlemciler içersinde toplam % 0,996 altın olduğu tespit edilmiştir. Bu oran 100 kg. işlemcide 996 g. altına karşılık gelmektedir.

METAL RECOVERY ORIENTED PRE-TREATMENT AND PROCESS OPTIMIZATION FROM ELECTRONIC SCRAPS AND CIRCUIT BOARDS

SUMMARY

The electrical and electronic technology grows very fast. With this growth a very large electrical and electronic waste material will dismiss. If one considers that the electrical and electronic waste material contains extensive valuable metals and the metals which are difficult to take from the substance , will the recycling of the waste material becomes thus more important and inevitable.

In this work circuit boards and processors are used. For the recycle of circuit boards some pre-processes were applied like disassembling the recyclable electronic parts, separating the solders, breaking and grinding the circuit boards, magnetic separation, and density separation. For the recycle of the processors grinding and magnetic separation were applied.

Electric and electronic equipment wastes include %30 plastics, % 30 refractory oxides, %40 metals. The most of plastics are polyolefins, polyesters and polycarbonates. Metals are two kinds as base metals and precious metals. Base metals are copper (% 20), iron (% 8), tin (% 4), nickel (% 2), lead (% 2), alüminum (% 2) and zinc (% 1). Precious metals are gold (% 1), silver (% 0,2) and paladium (% 0,005).

Following results were obtained by the experimantal work, carried out to find out the optimum conditions.

The optimum temperature conditions had determined 200-220 ^{o}C for the part-removal processes.

As a result of chemical analyses of processors, % 0,996 gold was determined in the processors.

1. GİRİŞ

Günümüzde elektronik ve bilgisayar teknolojisi çok hızlı bir şekilde ilerlemekte bu gelişimleri günü gününe takip etmek neredeyse imkansız hale gelmektedir. Bugün alınan bir bilgisayar eski model olmaktadır ve bu değişime ayak uydurmanın zorluğu bir kez daha gözler önüne serilmektedir. Bilgisayar ve elektronik teknolojisinde sürekli yenilenen ekipmanlar bir önceki ekipmanlardan daha hızlı ve daha güçlü olmaları nedeniyle eski ekipmanların hurdaya ayrılmasına sebep olmaktadır.

Bu hızlı teknolojik gelişime paralel bir hurdaya ayrılmanın söz konusu olduğu dünyamızdaki elektronik hurdaların ne kadar büyük bir yer kapladığı ve buna bağlı olarak çevreye ne denli zarar verdiği açıktır. Bu durumda elektrik ve elektronik ekipman hurdalarının geri dönüşümünün ne denli önemli olduğu görülmektedir.

Bu tez çalışmasında ağırlıklı olarak bilgisayar hurdalarının önemli bir bölümünü oluşturan baskılı devreler ve işlemciler kullanılarak metalik değerlerin geri kazanılmasına yönelik proseslerde kullanılacak numunelerin hazırlanması amacıyla ön işlemler araştırılmıştır. Elektrometalurjik, pirometalurjik ve hidrometalurjik geri kazanım proseslerinde kullanılacak en uygun giriş hammaddesinin oluşturulması amacını taşıyan bu çalışmalarda ön işlemleri içeren proses adımları tasarlanmış incelenecek parametreler seçilmiş ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

2. GENEL DEĞERLENDİRME

Türkiye'de ve Dünya'da her türlü metalin birincil kaynaklardan yani cevherden kazanımı oldukça zorlaşmış ve bu doğrultuda maliyeti de büyük ölçülerde artmıştır. Cevherden metal kazanmanın zorlaştığı bu dönemlerde ikincil kaynaklardan yani hurdadan geri dönüşüm yapılmaya başlanmıştır. Geri kazanım yapılan en önemli hurda çeşitlerinden birisi ise elektronik hurdalardır. Kullanım ömrünü tamamlamış her türlü elektronik ürün bir elektronik hurdadır.

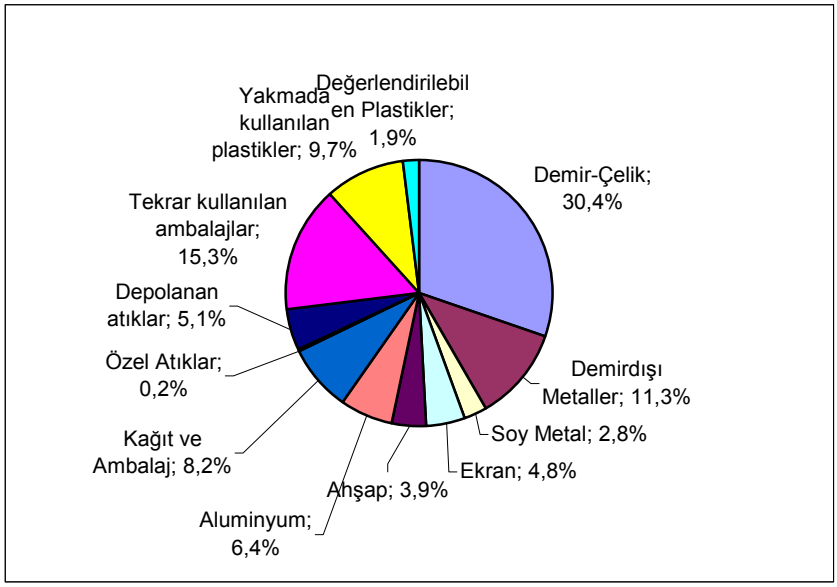
Elektrik ve elektronik ekipmanların miktarı bugünlerde çok yüksek değerlerdedir. Bu ekipmanların tüketiminin çok hızlı bir şekilde artması ve kısa ömürlü olması elektrik ve elektronik ekipman hurdalarının miktarının sürekli artmasına neden olmaktadır. En hızlı büyüyen hurda kategorisi, Avrupa'da özellikle, elektrik ve elektronik ekipman hurdalarıdır. Batı Avrupa' da 1998 yılında 6 milyon ton elekrik - elektronik hurda açığa çıkmıştır. Amerika' da ise 2004 yılında ömrünü tamamlamış 315 milyon bilgisayar açığa çıkmıştır. Bu kadar fazla elektrik -elektronik ekipman hurdasının bulunduğu bir ortamda etkili bir elektrik ve elektronik ekipman hurda geri dönüşüm stratejisi gerekmektedir. Elektrik ve elektronik ekipmanların üretiminin oldukça kompleks olması ve ürünlerin üzerinde bulunan materyallerin heterojen olarak dağılmasından dolayı bu ekipmanların geri dönüşümü de sınırlıdır[1].

Elektronik hurdaların sınıflandırması:

1) Bilgisayar, yazıcı, fotokopi makineleri, telefon ve faks cihazları.
2) Televizyonlar
3) Klima cihazları, fırınlar, çamaşır makineleri, çamaşır kurutucuları
4) Radyo, tuner, amplikatör, cd çalar, hoparlör ve bu cihazların kombine olduğu sistemler (Müzik setleri), ve ses kayıt cihazları,
5) Laboratuar, eczacılık cihazları v.s.

Elektronik hurdaları bileşim ve değerlendirme tekniği açısından incelersek; televizyon, bilgisayar ve görüntü cihazları, büyük oranda plastik (termoset ve termoplastik), baskı devre ve ekrandan oluşurlar. Değerlendirme ve yeniden kullanım teknikleri kısmen mevcut olmakla beraber teknolojik gelişim süreci devam etmektedir. Cep telefonları yüksek miktarda plastik ve elektronik parça içerirler. Bununla birlikte günümüzde cep telefonlarının en hızlı gelişen ve insanoğlunun elinde en sık değiştirdiği cihaz olması özelliği onu, miktarı sürekli artan bir elektronik hurda kaynağı yapmaktadır. Ev aletleri (bulaşık makinesi, çamaşır makinesi v.s.) ve küçük elektrikli cihazların ana komponentleri plastik ve metallerdir. Metal kısımların yeniden değerlendirme teknikleri mevcuttur. Sentetik kısımları ise özellikle 1990 öncesi üretimlerde çok problemlidir. Bu cihazların hurdalarının hemen hemen tümü yerel toplayıcılar veya üretici firmalar tarafından toplanmaktadır. Soğutma ve klima cihazlarının özel depolama ve değerlendirme prosesleri mevcuttur. Göreceli olarak yüksek oranda sentetik madde içerirler ve eski cihazlar halen florotetrakarbonlu soğutuculudur. Elektrik lambalarının temel yapıları camdır. Cıvalı aydınlatma lambaları zararlıdır. Depolama ve değerlendirme teknikleri mevcuttur. Piller ve aküler kısmen zehirli madde içerirler (cıva ve kadmiyum). Geri kazanımları mümkündür[2].

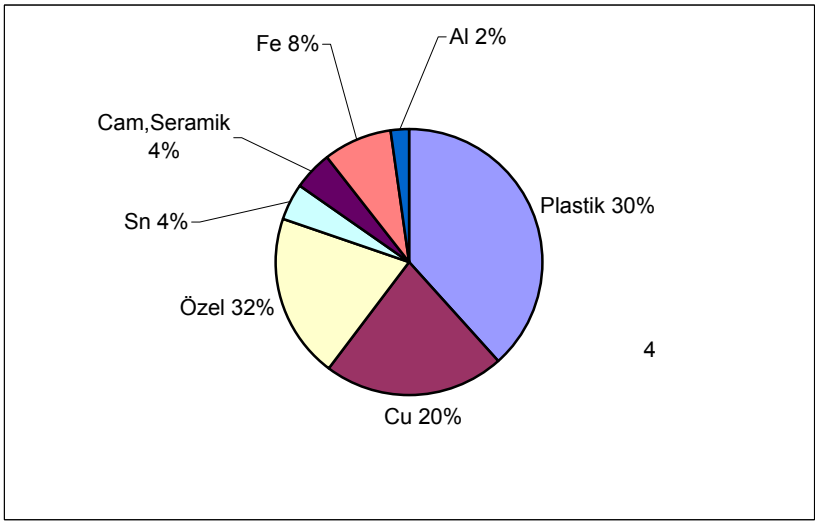
2002 yılında IBM'nin toplam elektronik hurda miktarı 4153 ton civarındadır. Bu miktarın geri kazanım oranı ise % 94,7'dir. Şekil 2.1' de 2002 yılında IBM'nin toplam elektronik hurda dağılımı görülmektedir[3].



Şekil 2.1: 2002 yılında IBM'nin toplam elektronik hurda dağılımı[3].

2.1. Elektrik ve Elektronik Ekipman Hurdalarının Kimyasal Bileşimi

Elektronik hurdaların bileşenlerine göre dağılımı Şekil 2.2' de gösterilmektedir. Şekil 2.2' de görülen temel bileşenlerin yanında az mertebede de olsa altın, gümüş ve platin gibi soy metaller de vardır ki; bunların elektronik hurdaların geri kazanımında ekonomik açıdan büyük katkıları vardır[4].



Şekil 2.2: Elektronik hurdaların bileşenlerine göre dağılımı[4]

Elektronik hurdalar özellikle bakır, aluminyum ve çelik gibi çeşitli metallerin bir karışımını içerir. Bu metallere ek olarakta plastik ve seramiklerinde çeşitli türleri bulunmaktadır. Aynı zamanda bu kompleks yapının içersinde az miktarda altın, gümüş, platin, paladyum ve rodyum gibi metallerde bulunmaktadır. Bu karışım oldukça heterojen bir dağılım göstermektedir[4].

Elektronik hurdalar %30 plastik, % 30 Refrakter oksitler, % 40 metalden meydana gelmektedir. Plastiklerin büyük bir kısmını polyolefinler, polyesterler ve polikarbonatlar oluşturmaktadır. Plastiklerin % 15-20' lik bir kısmınıda politetrafloretilen ve polivinilklorür oluşturur. Refrakter oksitlerin % 50' sini silika oluşturmaktadır. Ayrıca yanmış kül olmuş baskı devrelerinden refrakter oksitlerin % % 20' si kadar alumina, % 20' si kadar alkali ve toprak alkali oksitleri ve % 10' u kadar da baryum titanat gibi piezoelektriklerdir. Metaller, ana metaller ve soy metaller olmak üzere iki sınıfta incelenebilir. Toplam hurdanın % % 40' ını oluşturan ana metaller bakır (% 20), demir (% 8), kalay (% 4), nikel (% 2), kurşun (% 2), alüminyum (% 2) ve çinkodur (% 1). Soy metaller ise altın (% 1), gümüş (% 0,2) ve paladyumdur (% 0,005)[4][5].

Elektrik ve elektronik hurdalar çeşitli ölçü ve şekillerde büyük miktarlarda bileşenlerden oluşur. Tablo 2.1.' de elektrik ve elektronik ekipman hurdalarının zararlı bileşenler ve bulundukları yerler gösterilmiştir[6].

Tablo 2.1: Elektrik ve elektronik ekipman hurdalarındaki önemli zararlı bileşenler[6].

Malzemeler ve Bileşenler	**Tanımlama**
Piller	Kurşun, civa ve kadmiyum her zaman pillerin içersinde bulunan ağır metallerdir.
Katot ışın tüpleri	Panel camlarındaki floresan kaplama örtüsünün ve konik camların içindeki kurşun
Elektrik devre anahtarı gibi.civa içeren bileşenler	Civa termostatlarda,sensörlerde,rölelerde ve elektrik devre anahtarlarında kullanılır. Aynı zamanda medikal ekipmanlarda,bilgi taşıma, iletişim ve mobil telefonlarda da kullanılır.
Toner kutuları	Ayrı ayrı elektrik ve elektronik ekipman hurdalarından sökülmüş toner ve toner kutuları
Baskı devreleri	Kızılötesi dedektörler ve yarı iletkenler gibi bazı bileşenlerin içindeki kadmiyum
LCD ekranlar	Elektrik ve Elektronik ekipman hurdalarından çıkarılan 100 cm^2'den büyük alana sahip olan LCD ler
Alev almayı geciktirici halojenler içeren plastikler	Alev almayı geciktirici halojenler içeren plastikleri yakma esnasında zehirli bileşenler oluşabilir.
Gaz boşaltma lambaları	Civa bulunur.

2.2. Elektrik ve Elektronik Ekipman Hurdalarının Fiziksel Karakterizasyonu

Elektrik ve elektronik ekipman hurdaları çeşitli metal ve plastik malzemelerin bir araya gelmesi ile oluşmaktadır. Bu hurdalar, bakır, alüminyum ve altın gibi birçok metalin ikincil kaynakları arasında gösterilmektedir. Altının yanı sıra gümüş ve paladyum gibi soy metallerde bulunmaktadır. Bu soy metallerin fiziksel formları, bakır laminant üzerindeki altın veya paladyum kaplama, bağlantı tellerinde saf altın, nikel veya demir üzerinde gümüş veya altın kaplama, platin grubu metalleri içeren metal alaşımları şeklindedir. Elektrik ve elektronik ekipman hurdalarındaki bu malzemelerin efektif olarak ayrılabilmesi bu malzemelerin fiziksel özelliklerindeki farklılıklara bağlıdır. Bu fiziksel karakterizasyon farklılıkları mekanik geri dönüşüm sisteminin gelişmesi için çok önemlidir. Aşağıda fiziksel özelliklere bağlı ayırma teknikleri açıklanmıştır[6].

2.2.1. Yoğunluk Özellikleri

Yoğunluk farkına göre ayırım yapabilmek için elektrik ve elektronik ekipmalardaki malzemelerin yoğunlukları bilinmelidir. Tablo 0.2.'de elektrik ve elektronik ekipmanlar içinde kullanılan malzemelerin yoğunlukları gösterilmiştir[6].

Tablo 2.2: Elektronik ekipmanlarda kullanılan metallerin yoğunlukları[6].

Malzeme	**Yoğunluk, ρ ($\times 10^3$ kg/m^3)**
Bakır	8,93
Cu-Zn Alaşımları	8,4
Alüminyum	2,70
Magnezyum	1,74
Gümüş	10,49
Çinko	6,92
Altın	19,32
Pirinç	8,40
Nikel	8,90
Kalay	7,29
Kurşun	11,34
Alaşımlı çelik	7,7

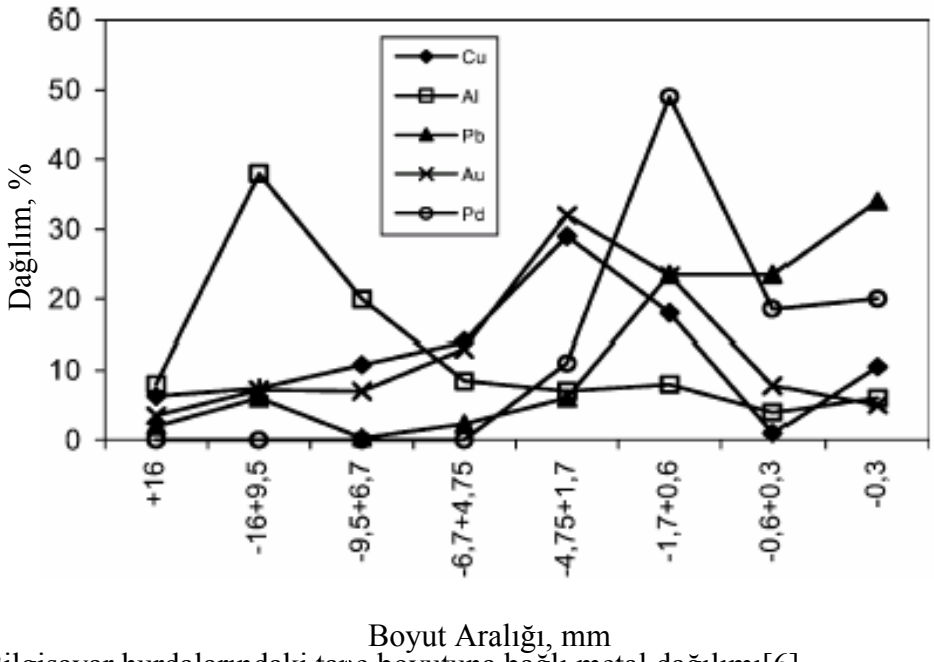
2.2.2. Partikül Boyutu Özellikleri

Partikül boyutu, şekli ve serbestleşme derecesi mekanik geri dönüşüm prosesi için çok önemli bir rol taşımaktadır. Hemen hemen tüm mekanik geri dönüşüm proseslerinde kesin bir efektif boyut ölçüsü vardır[6]

Bilgisayar ve baskı devresi hurdalarının karakterizasyonu; laboratuar şartları altındaki 2. kırma işleminden sonra bilgisayar ve baskı devreleri hurdalarının tane boyutunun yaklaşık 5 mm. altındaki bir değere indiğini gösterir. Kusursuz serbestleşme % 99 verimle bu tane boyutunda gerçekleşir. Ayrıca endüstriyel testlerde , aynı kırma derecelerinde ve tane boyutunda serbestleşme derecesi % 96.5 ile % 99.5 arasında olduğu tespit edilmiştir[6].

Şekil 2.2.' de bilgisayar hurdalarında tane boyutuna bağlı metal dağılımı görülmektedir. Bu grafiğe göre, alüminyum 6,7 mm. üzerindeki kaba parçalarda en yüksek dağılımlara çıkmaktadır, fakat diğer metallerde parça boyutu 5 mm. in altında iken yüksek dağılımlar görülmektedir[6].

Efektif bir ayırma tekniği seçmek için parça boyutu özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Ayrıca metal içeriklerini yükseltmek için eleme prosesi getirilebilir[6][7].



Şekil 2.3: Bilgisayar hurdalarındaki tane boyutuna bağlı metal dağılımı[6]

2.3. Elektrik ve Elektronik Ekipman Hurdalarının Geri Kazanımı ve Faydaları

Doğal hammadde kaynaklarının azalması insanoğlunu başka hammadde kaynakları bulmaya mecbur kılmıştır. Bu kapsamda içersinde soy metalleri ve demir grubu alaşımları içeren elektrik ve elektronik ekipman hurdalarının geri dönüşümü gündeme gelerek büyük önem kazanmıştır. Aynı zamanda üretilen mal ve üretim esnasında ortaya çıkan atıkların kullanım ömürlerini doldurduktan sonra yasalar gereği bir şekilde üretim - ekonomi çarkına geri döndürülmesi zorunludur

Elektrik ve elektronik ekipman hurdalarının geri kazanımda bukadar önemli olmasının nedeni içerdiği değerli metallerdir. Elektrik ve elektronik ürünlerde kullanılan soy metaller altın, gümüş, paladyum, küçük miktarlarda rodyum ve diğer platin grubu metallerdir. Bu metallerin içersinde en fazla geri kazanım çalışması altın için yapılmaktadır. Çünkü son 40 yıl içinde elektronik parçalarda oldukça fazla miktarlarda altın kullanılmıştır. A.B.D. ve Batı Avrupa'da endüstrideki altın tüketimi 1968'de 82 ton ve 1973' te ise 127 ton gibi yüksek bi rakama ulaşmıştır. Bununla birlikte altın kullanımı 1975' te 67 tona düşmüştür. 1978 yılından beri tüketim miktarı yıllık 80 ton civarında seyretmiştir. Bakır, alüminyum ve demir gibi ana metallerin geri kazanımı elektronik parçaların imalatında yüksek miktarda kullanıldıkları için ilgi çekmektedir[2].

2.3.1. Baskı Devrelerinin Geri Kazanılması

Elektronik hurdaların geri kazanılmasında pirometalurjik, hidrometalurjik, elektrokimyasal ve biyokimyasal işlemler uygulanmaktadır. Hangi geri kazanım prosesinin seçileceği yada farklı proseslerin hangi akış sıralamasında tercih edileceği elektronik hurdanın cinsi, fiziksel özellikleri ve geri kazanılması istenilen en önemli metalin cinsine göre değişiklik göstermektedir. Aşağıda hidro-elektro-piro metalurjik geri kazanım yöntemlerine kısaca değinilmiştir.

2.3.1.1.Hidrometalurjik geri kazanım yöntemi

Hidrometalurjik işlemlerin en önemli adımları uygun tane boyutunda hazırlanmış elektronik huradanın uygun koşullarda asidik ve/veya bazik çözümlendirme tabi tutulması ve çözümlendirme işlemlerinden sonra elde edilmek istenen değerli metale

göre çözeltiye solvent ekstraksiyon, kimyasal çöktürme, sementasyon, iyon değişimi veya filtrasyon gibi işlemler uygulanarak bir geri kazanım prosesi tamamlanabilir [2][16].

2.3.1.2.Pirometalurjik geri kazanım yöntemi

Pirometalurjik proses özellikle platin grubu metallerin konsantre edilmesini sağlayan bir mekanizmadır. Proseslerde platin grubu metaller metalik fazda toplanırken istenmeyen malzemelerin çoğu curuf fazında toplanır. Pirometalurjik proses organik malzemelerin giderilmesi için yakma, boyut küçültme, şarj hazırlama, ergitme ve son olarakta platin grubu metal konsantrelerinin üretimi kademelerinden oluşur[4].

2.3.1.3.Elektrometalurjik geri kazanım yöntemi

Elektronik hurdalardan değerli metallerin geri kazanımı sırasında kullanılan değişik rafinasyon yöntemleri elektrokimyasal ağırlıklıdır. Selektif çözümlendirme, iyon değişimi ve solvent ekstraksiyon gibi hidrometalurjik işlemlerle zenginleştirilen metaller elektrokimyasal olarak sulu çözeltiden katotta direkt olarak redüklenirler. Bakır ve nikel içeren sülfat çözeltisinden bakırın elektrolizle ayrılması bu yönteme bir örnek teşkil eder[2].

2.3.1.4.Biyokimyasal geri kazanım yöntemi

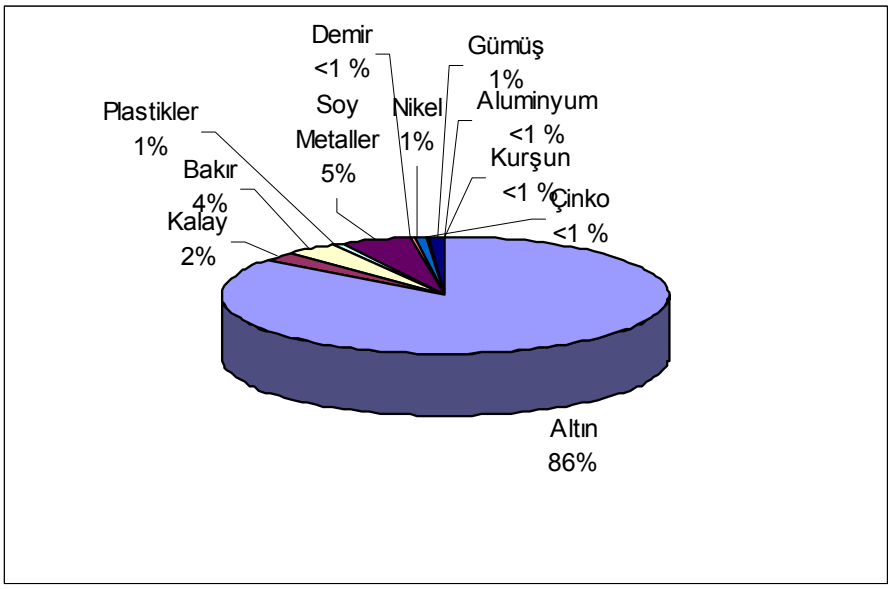
Altın kaplı elektronik hurdalardan altının geri kazanımı için biyokimyasal olarak bakteriyel liç yapılmaktadır. 20-35 ^{o}C' de pH' ı 2,5' ten küçük olan bir bakteriyel kültür ve 10 g/Hfe^{3+} içeren bir çözelti içinde kimyasal işleme tabi tutulur. İki gün sonra altının %97' si tabakalar halinde geri kazanılır[2].

2.3.2. Ekonomik Faydaları

Elektronik hurdalardan elde edilen ekonomik fayda rakamlara döküldüğünde çok büyük değerler ortaya çıkmaktadır. Tablo 2.3.'de ve Şekil 2.3.' de görüldüğü gibi bir ton elektronik hurdanın geri dönüşümünün maddi karşılığı yaklaşık 10.000 USD' dir[3].

Tablo 2.3: Bir ton elektronik hurdadan elde edilen gelir tablosu[3]

MALZEME	TOPLAM DEĞER ($)
Altın	**7771.1**
Soy Metaller (Pd, Rh, In)	**501.9**
Bakır	**392,0**
Kalay	188,0
Gümüş	137.6
Nikel	89.2
Plastik	60,0
Aluminyum	28.4
Çinko	9.6
Kurşun	8.4
Demir	7.2



Şekil 2.4: 1 Ton elektronik hurdadan elde edilecek gelir dağılımı[3]

2.3.3. Çevresel Faydaları

Elektrik ve elektronik ekipman hurdalarındaki baskı devreleri çok bileşenli olmaları ve tüm parçalarında genellikle farklı malzemelerden oluşmaları sebebiyle geri kazanımda büyük bir problem teşkil etmektedirler. Ekonomik açıdan değerli olan kısımların geri kazanılmaları esnasında hali hazırda uygulanan prosesler içinde çevreye zararlı maddelere dönüşen yapılar ile yan yana bulunması elektronik hurdaların geri kazanımını çevre faktörleri açısından oldukça önemli duruma getirmektedir. Elektronik hurdaların geri dönüşümü yapılarak bu malzemelerdeki ağır metallerin içme sularına karışarak insan sağlığını tehlike altına alma riski ortadan kalkar. Ayrıca elektronik hurdalardan açığa çıkan bazı kimyasalların atmosferde serbest kalarak insan sağlığına zarar vermesi engellenir. Tablo 2.4.'de elektronik hurdalarda bulunan zararlı maddelerden bir kısmı görülmektedir[3].

Tablo 2.4: Elektronik hurdalarda bulunan zararlı maddeler[3].

Adı	Çevreye Verdiği Zarar	Kullanıldığı yer
Kurşun	Felç, erken ölüm ve sinir sisteminde büyük zararlar meydana getirir.	Özellikle monitörlerde
Kadmiyum	İnsan sağlığı için zehirli olarak bilinir.	Yarı iletkenlerde ve plastiklerde
Civa	Beyinde kronik zararlara yol açar.	Civanın dünyadaki
Hekzavalent Krom	Hücre ve DNA' da geri dönüşümü olmayan büyük zararlar meydana gelir.	Korozyondan koruma amaçlı kullanılır.

Kullanılmış elektronik parçaların atılması büyük bir problem teşkil etmektedir. Buna ek olarak atık solüsyonları ve üretim tesislerinden gelen diğer hurdaları çevreye karışmadan önce geri kazanıma tabi tutarak zararsız hale getirmek gerekir.

Devre malzemeleri halojenize edilmiş yanmaz maddelerden oluşmaktadırlar. Bu maddelerin mekanik veya termik parçalanması çok yüksek sıcaklıklarda ve diğer süreçleri uzman kontrolünde yapılmadığı taktirde dioksin ve furan gazlarının oluşumu kaçınılmazdır. Cihazlardaki kalite artışı ve teknolojik gelişim elektronik devrelerin hafif yapılmasını zorunlu kılmakta ancak bu gelişim soy metal kullanımının artmasını da beraberinde getirmektedir. Diğer taraftan toplam üretim

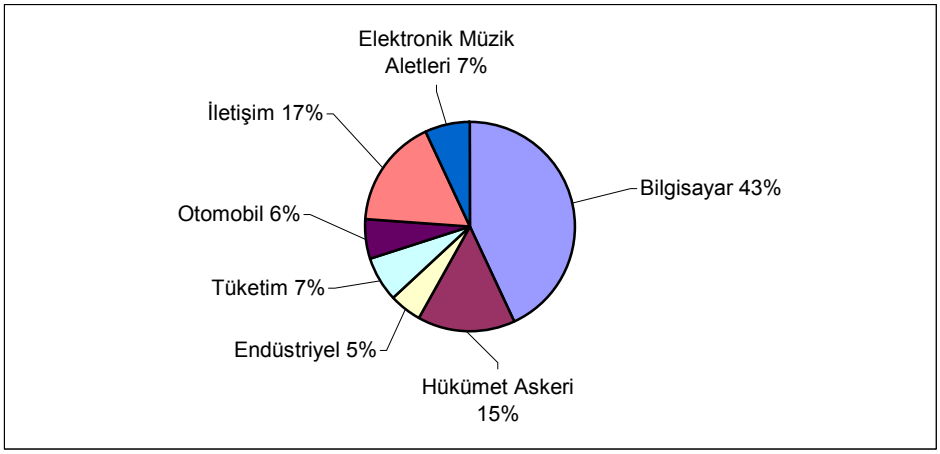
artışı gelecekteki renkli metal ve baskı devre hurdalarının miktarını daha da arttıracaktır. Bu hurdaların işlenmesi sırasında farklı birçok metalin yanı sıra 40 ile 60 arasında farklı plastik türüde elde edilmektedr. Bunlardan bazıları özel bir işleme tabi tutulmadıkları taktirde çevre sağlığı açısından zararlıdır ve zehirli / zararlı atık sınıfına dahildirler. Bu gruba özellikle civa içeren parçalar, piller, ekran tüpleri, lambalar ve sıvı kristal göstergeler dahildir. Elektronik hurda kazanımında temel esas zararlı atık sınıfına giren kısımların depolanması ve hurdadan maksimum kazanımın sağlanmasıdır[8].

3. ELEKTRONİK HURDALARIN ANA BİLEŞENLERİNDEN BASKI DEVRELERİ VE GERİ KAZANIMLARI

Modern elektronik sistemlerin verimli bir şekilde kusursuz çalışabilmesi; elektrik-elektronik bileşenlerini içeren yüksek kalitedeki kompakt baskı devreleri ile sağlanmaktadır. Elektronik hurdalardaki baskı devreleri yapılarında farklı malzemeleri bir arada bulundurmaktadır. Baskı devrelerinin bileşiminde bulunan başlıca malzemeler; cam-seramikler, demir-çelik malzemeler, aluminyum, lehim, reçine ve plastikler ve diğer malzemelerdir. Baskı devre malzemeleri halojenize edilmiş yanmaz maddelerden yapılmıştır. Baskı devre plakasının malzemesi reçinedir. Bakı devre plakalarının geri kazanımı konusunda birçok ülke tarafından günümüzde uygulanan ve halen geliştirilmekte olan teknolojiler mevcuttur. Türkiye'de son zamanlarda genel olarak elektronik hurdaların ve baskı devrelerinin geri kazanılması konusunda bazı firmalar tarafından çalışmalar yapılmaktadır. Bu firmalara örnek olarak Arçelik ve Beko' yu gösterebiliriz. Ancak yapılan çalışmalar henüz proje aşamasındadır[2].

3.1.Elektronik Sanayinde ve Elektronik cihazlarda Baskı Devrelerinin Kullanım Alanları

Transistörün keşfedildiği 1947 yılından itibaren elektronik sistemlerin ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla geliştirilmeye başlanan baskı devrelerinin elektrik-elektronik teknolojisindeki kullanım alanları Şekil 3.1.'de gösterilmiştir[9].



Şekil 3.1: Baskı Devrelerin Elektronik Teknolojisindeki Kullanım Alanları[9]

Servis hizmetlerinin sürekliliğinin önemli olduğu bilgisayar kontrollü proseslerde, askeri haberleşme sistemlerinde yüksek kalitede baskı devreler tercih edilmektedir. Endüstriyel amaçlı kullanımlarda, örneğin fabrika şartlarında kullanılan baskı devrelerinin, kullanıldıkları cihazın çalışma ömrü süresince, kirlilik, sıcaklık, titreşim ve elektromanyetik radyasyon gibi koşullar altında hatasız ve en güvenli şekilde çalışması gerekmektedir. Tüketim amaçlı kullanılan baskı devrelerinin en önemli özellikleri fiyatlarının ucuz olmasıdır. Ayrıca bu baskı devrelerinin kullanım ömürleri genellikle 10 yıldan azdır[9].

Günümüzde kullanılan baskı devreler, uygulama alanları ve fiyatlarına göre farklı gruplara ayrılabilmektedir. Bunlar; tek yüzlü, çift yüzlü, çok katmanlı baskı devreleri olarak sınıflandırılmaktadır[9].

3.2.Baskı Devrelerinin Fiziksel Karakterizasyonu

Fiziksel özellikleri açısından tek ve çift yüzlü devrelerin sert ve/veya esnek yapıda olması istenirken, buna karşılık ince di elektrik yapıdaki devrelerden çok katmanlı devreler üretilmektedir. Özellikle lap-top ve cep telefonu benzeri, ileri teknoloji ürünü ve ağırlığın önem kazandığı elektronik ürünlerde devre sayısının 3-4 ile 24-30 arasında değiştiği esnek ve çok katmanlı devrelerin kullanımı yaygınlaşmaktadır[9].

Bunlara ilave olarak, endüstriyel amaçlı ve özellikle de sürekli servis hizmetinin sunulduğu tüketim, iletişim ve savunma sektörlerinde kullanılan baskı devrelerini ayrı bir grup olarak ele almak mümkündür. Bu sınıflandırmada tüketim amaçlı

kullanılan baskı devrelerinin kullanım ömürleri genellikle on yıldan az olmakla beraber, en önemli özellikleri fiyatlarının ucuz olmasıdır. Endüstriyel amaçlı kullanımlarda, örneğin fabrika koşullarında kullanılan baskı devrelerinin kullanıldıkları cihazın ömrü süresince, titreşim, sıcaklık, kirlilik, elektromanyetik radyasyon gibi şartlar altında hatasız ve güvenilir bir şekilde çalışması gerekmektedir. Servis sürekliliğinin kritik olduğu haberleşme sistemlerinde, bilgisayar kontrollü proseslerde ve askeri sistemlerde yüksek kalitede (çok katmanlı) baskı devreler tercih edilmektedir[9].

3.3.Baskı Devrelerinin Bileşimi

Baskı devreler bileşim açısından incelendiğinde, birçok metal,organik ve anorganik bileşiklerden oluştuğu bilinmektedir. Kimyasal bileşim açısından da bakır, altın, gümüş, paladyum, kalay, demir ve daha az miktarda kobalt, krom, titanyum, volfram, alüminyum, berilyum, bor gibi çeşitli metalik değerleri içermektedir. Altın, gümüş gibi soy metallerin geri kazanımda ekonomik açıdan büyük katkıları vardır. Cihazlardaki kalite-teknolojik gelişim elektronik devrelerin hafif yapılmasını zorunlu kılmakta ve bu gelişimde beraberinde soy metallerin kullanımının artmasını getirmektedir. Altın ve gümüş baskı devrenin elektronik parçalarında ve soket girişlerinde, farklı ünite bağlantı noktalarında bulunur. Bakır, cam, fiber ve reçine devre plakasında yer almaktadır.

Tablo 3.1.'de baskı devreleri oluşturan metalik değerlerin oranları ve kullanım yerleri verilmektedir. Verilen metalik değer oranları ortalama değerler olup, baskı devrelerinin kullanıldıkları cihazın cinsine ve yaşına göre farklılık gösterebilmektedir. Örneğin 80086 80286 serisi bilgisayarlarda ve siyah-beyaz televizyonlarda soy metal ve kalay oranı yüksek iken, yeni nesil bilgisayarlarda soy metal oranı azalmaktadır[9].

Tablo 3.1: Baskı devrelerini oluşturan metalik değerlerin oranları ve kullanım yerleri[9]

MALZEME	**KULLANIM YERLERİ**	**%**
Seramik- Cam	Seramik Bileşenlerde,Devre Plakasında	~33
Plastik	Plastik bileşenlerde,konnektörlerde	~33
Toplam Metal		~33
Bakır	İletken bileşenlerde,devre plakasında	12
Demir	Mekanik bileşenlerde,vidalarda	7
Nikel	Mekanik Bileşenlerde	2
Çinko	Kaplama olarak malzemeler üzerinde	<1
Kalay	Lehimde	<1
Kurşun	Lehimde	<1
Mangan	Kuru Elektrolitik kapasitörlerde	<1
Diğer Metaller	Ag,Au,Rh,Pd, In,Cr,Ti,W,Al,Ba,Be,Co	<8

Baskı devrelerinde bulunan bazı kimyasal bileşikler Tablo 3.2.' de görülmektedir.

Tablo 3.2: Baskı devrelerinde bulunan bazı kimyasal bileşikler[2]

Trimetolbenzol	Dimetilfenol	Hidrosometil benzaldehit
Fenol	Aromatik oksijen içeren bileşikler	Triklornaftalin
Metilfenol	En az 8 karbonlu alkenler	Benzol bileşikleri
Metilstinol	Dodesilfenol veya izomer	Terfenil veya izomer
Silikon bileşikleri	En az 5 karbonlu alifatik bileşikler	Nafronitril veya izomer
Sitinol veya izomer	Pentaklornaftalin	Hekzaklornaftalin
Tetrasiloksan	Trifenil fosfat	Fenol içeren bileşikler
Ftenalasit ester	Pentasiloksan	Tetraklornaftalin

Elektrik ve Elektronik ekipmanlar içerdikleri malzemeler ve bileşenleri göz önüne alındığında oldukça kompleks ve heterojen bir yapıya sahiptirler. Değerli

malzemeleri ve tehlikeli maddeleri teşhis etmek ve rakamlarla belirlemek, çevreye uygun ve düşük maliyetli bir geri dönüşüm sistemi geliştirmek için önemlidir. Bu geri dönüşüm sisteminin ilerletilmesi için hurda akışının fiziksel karakteristiği iyi anlaşılmalıdır[2].

3.4.Mekanik ve Fiziksel Geri Dönüşüm Prosesi

Elektrik elektronik ekipman hurdalarının geri kazanılmasında büyük önem taşıyan ön işlemler sırasında yapılan parça boyutu küçülmesi ile boyut karakterizasyonu sağlanmasının üç temel amacı vardır. Birincisi küçük tane boyutlu parçalar büyük tane boyutlu parçalara göre daha kolay tutulabilir. İkinci neden elektrostatik ayırma işlemi esnasında aynı tane boyutlu ve aynı şekilli partiküllerin daha efektif olarak ayrılabilmesidir. Son amaç ise farklı maddelerin birbirinden ayrılmasıdır[10][11]. Mekanik ve fiziksel geri dönüşüm prosesleri aşağıda verilmiştir.

3.4.1. Demontaj

Demontaj; belli bir amaç için kullanılan malzemenin tüm parçalarının ayrılması yada kısmi olarak demontajının yapılması yani bir parçasının, bir grubunun veya bir bileşeninin sökülerek ayrılması olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada amaç elektrik elektronik ekipman hurdalarının geri kazanılmansa yönelik ön işlemleri yapabilmek olduğundan demontaj işlemi de büyük önem taşımaktadır. Elektrik elektronik ekipman hurdalarının demontajı vazgeçilemeyecek bir prosestir[6].

- Tekrar kullanılabilir parçalar önceliklidir.
- Zararlı bileşenlerin demontajı zorunludur.

Demontaj prosesinin planlanma amacı demontaj sistemlerinin yapılandırılmak ve demontaj stratejilerini oluşturmak için prosedürler ve yazılım cihazlarının geliştirilmesidir[6].

Giren ve çıkan ürünlerin analizi: Bu kısımda tekrar kullanılabilir, değerli ve zararlı bileşenler ve maddeler tanımlanmalıdır[6].

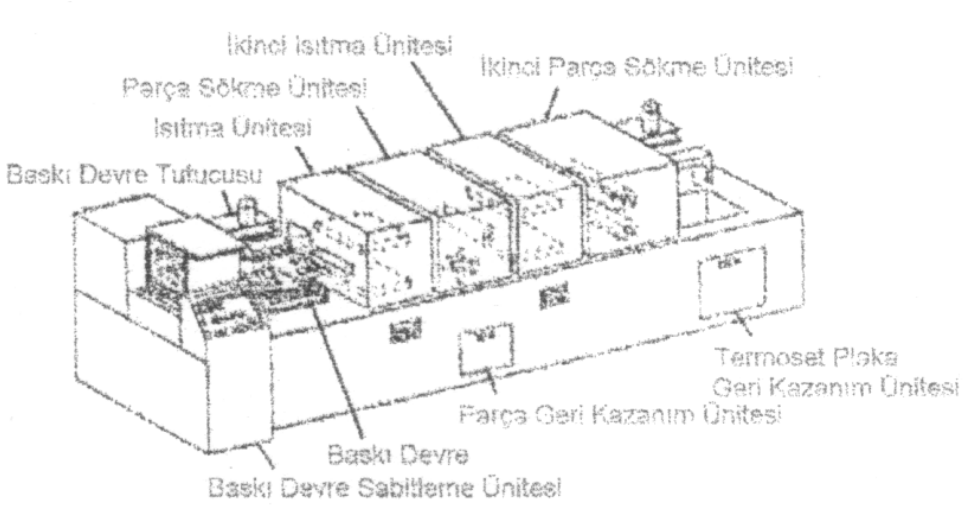
Sonuç Analizlerin Belirsizliği: Demontajın belirsizliği, demontaj yapılan ürünün içindeki ek veya bozuk parçalardan, kullanıcıların elektronik ürünlerinin modellerini yükseltmesi ve ya düşürmesinden ve demontaj kayıplarından dolayı oluşur[6].

Sökme stratejisinin belirlenmesi: Son olarak, zararlı veya zararsız demontaj kullanımından birine karar verilir[6].

3.4.2. Lehim Sökme İşlemi

Demontajdan çıkan baskı devreleri gibi elektrik elektronik ekipman hurdalarına üzerlerinde lehimle tutturulmuş parçaların kolayca ayrılması ve hurda üzerinde bulunan lehimin sistemden uzaklaştırılması için lehim sökme işlemi uygulanır.

Baskı devrelerinin geri kazanımı için Şekil 3.3.' de görülen cihaz geliştirilmiştir. Bu cihaz baskı devrelerindeki lehimin ayrıldığı iki ısıtma üitesi ile mekanik etkiyle elektronik devredeki parçaların söküldüğü ilave iki sistemden oluşmaktadır[9]



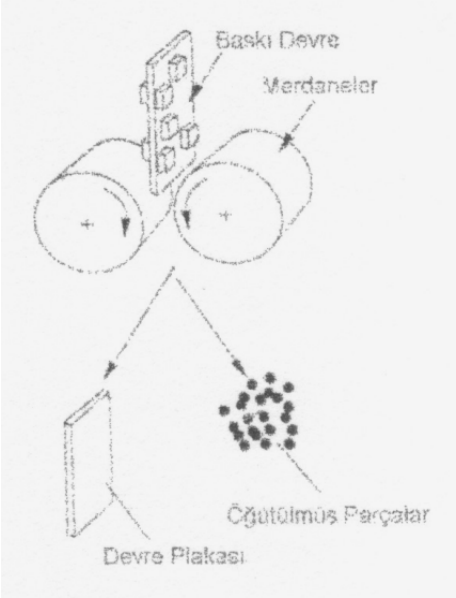
Şekil 3.2: Baskı devrelerin geri kazanımı için geliştirilen lehim sökme fırını

Cihazın parça sökme kısmında elektronik parçaların devreden ayrılmasını sağlayan pervaneler kullanılmaktadır. Baskı devre cihaza girdiğinde ısıtma ünitesinde 70 sn'de lehimin ergime sıcaklığına ulaşmaktadır. (yaklaşık 180 ^{0}C). Bir sonraki ünitede elektronik parçalar, mekanik darbe prensibi ile çalışan pervanelerle ayrılır. Bası elektronik devre, ikinci ısıtma ünitesinde ise aynı sıcaklıkta yaklaşık 30 saniye kalır ve arta kalan parçalar makas görevi gören pervaneler ile devreden ayrılır. Cihaz, bu

yöntemle 120 saniyede bir devreyi işleyebilmektedir. Baskı devre üzerinde bulunan parçalar genellikle hiçbir hasara uğramaksızın başarılı bir şekilde devre plakasından ayrılmaktadır. Geri kazanılan bu parçalar önemli bir metal kaynağıdır, örneğin metal fraksiyonun altın içeriği altın cevherine oranla daha yüksektir. Ayrıca bazı elektronik üniteler söküm işlemini takiben, güvenilirlik testlerinden geçirildikten sonra ilk kullanım amaçları doğrultusunda tekrar kullanılabilmektedir. Bu parçaların tekrar kullanımı, geri kazanımın yanı sıra tekrar kullanımı da mümkünkıldığından dolayı toplam parçanın geri dönüşümünün maliyetini minimize etmektedir ve "reuse" (tekrar kullanım), geri kazanım teknikleri içinde gittikçe artan bir eğilimle uygulama alanı bulmaktadır[9].

Baskı devrelerin geri kazanımı ile ilgili olarak geliştirilen ikinci cihaz, elektronik ünitelerin baskı devreden daha etkili bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Her biri karşılıklı yerleştirilmiş üç çift merdaneden oluşmaktadır. Daha önce geliştirilen birinci cihazla tüm parçaların uzaklaştıralamdığı veya elektronik parçaların vidayla ve/veya pimlerle tutturulmuş olduğu baskı devreler iki merdane arasındaki boşluğa yerleştirilmektedir[9].

Merdaneli tipte geliştirilmiş olan bu cihazın (Şekil 3.4.) çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir. Baskı devreler ilk çift merdane arasına elle yerleştirildikten sonra diğer merdane çiftlerine otomatik olarak beslenmekte ve yaklaşık 10 saniye sonra cihazı terk etmektedir. Cihazdan çıkan baskı devreler üzerindeki tüm parçalar, kırılmış küçük parçalar halinde devre plakasından ayrılmaktadır. Geri kazanılan parçalar ve reçine devre plakaları altın ve bakır kaynağı olarak kullanılabilmekte ve yeniden değerlendirilebilmektedir. Eğer tamamı lehimle tutturulmuş elektronik parçalardan oluşan devreler kullanılırsa cihazın verimliliği ilk cihaza göre daha yüksektir. (120 sn/devre < 10 sn/devre). Ayrıca merdaneli tip cihaz, hurdaların hacimsel olarak dahaaz yer kaplaması yani yığma yoğunluğunun azaltılması amacıyla da kullanılabilmektedir[13][9].



Şekil 3.3: Geliştirilen Merdaneli Tip Öğütücü[9]

3.4.3. Kırma İşlemi

Baskılı devrelere kırma işlemi, tane serbestleşmesinin sağlanması ve bir sonraki işlem adımına uygun tane boyutuna sahip hammadde elde edilmesine yönelik olarak gerçekleştirilen işlem adımıdır. Kesicilerde veya çekiçli kırıcılarda yapılan kırma işlemi sonucunda elektronik hurdalar yaklaşık >3 mm tane boyutuna ulaşır. Bir sonraki işlem adımına göre kırma işlemi daha düşük tane boyutu sağlayacak şekilde de tasarlanabilir[6].

3.4.4. Eleme İşlemi

Eleme işlemi tam anlamıyla bir mekanik geri dönüşüm prosesi değildir, fakat metal içeriğinin yükseltilmesi açısından önemlidir. Eleme işlemi gereklidir çünkü metallerin partikül boyutu ve şekil özellikleri plastiklerden ve seramiklerden farklıdır[6].

Metallerin geri kazanımında kullanılan birincil eleme metodu dönen elek veya tambur tarzı elek sistemidir. Bu sistem, genellikle otomobil hurdalarında ve katı belediye çöplerinde kullanılır ve hurdanın içindeki farklı tane boyutları ve şekillerdeki parçalar için elek deliklerinin tıkanmasına karşı mukavemetlidir.

Titreşimli eleme yöntemi demir dışı partiküllerin geri kazanımında en çok kullanılan yöntemdir[6].

3.4.5. Manyetik Ayırma İşlemi

Farklı manyetik duyarlılıktaki bireysel mineral tanelerinin, uygun bir manyetik alan içinde, başlıcası manyetik kuvvet olmak üzere, çeşitli kuvvetlerin (yerçekimi, sürtünme v.s.) bileşik etkileri nedeniyle birbirinden ayrılması yoluyla gerçekleştirilen ayırma yöntemine manyetik ayırma adı verilir[11].

Farklı manyetik duyarlılıkta olan minerallerin endüstriyel düzeyde birbirinden ayrılmasını sağlamak üzere geliştirilen cihazlara manyetik ayırma cihazı adı verilir[11].

Manyetik ayırıcılar, çalışma ortamının cinsine göre iki ana gruba ayrılır

- Kuru manyetik ayırıcılar
- Yaş manyetik ayırıcılar

Manyetik ayırıcılar, kullanış amacına göre üç ana gruba ayrılır

- Zenginleştirici manyetik ayırıcılar
- Koruyucu manyetik ayırıcılar
- Ağır ortamın tekrar kazanılmasında kullanılan manyetik ayırıcılar.

Manyetik ayırıcılar, manyetik alanın şiddetine göre ikiye ayrılır.

- Düşük alan şiddetli manyetik ayırıcılar
- Yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcılar

Manyetik ayırıcılar yapısal özelliklerine göre de dörde ayrılırlar.

- Makaralı manyetik ayırıcılar
- Tamburlu manyetik ayırıcılar

- Bantlı manyetik ayırıcılar
- Diskli manyetik ayırıcılar

Manyetik ayırma manyetit minerallerine doğrudan uyulanmaktadır. Ayrıca, ısıl işlem ile düşük manyetik özellik gösteren hematit, limonit, siderit, götit ve pirit gibi mineraller, yüzeylerinin manyetit haline gelmesi ile tıpkı manyetit gibi düşük alan şiddetli manyetik ayırma ile zenginleştirilebilir[11].

3.4.6. Yoğunluk Farkına Göre Ayırım

Mineral tanelerinin, akışkan bir ortam içinde, özgül ağırlık farkından dolayı değişik şekilde hareket ederek, birbirinden ayrılması ile gerçekleştirilen ayırma yöntemidir. Yoğunluk seerasyonunda, mineral tanelerinin akışkan ortam içinde hareket hızları ve özgül ağırlığının yanı sıra, minerallerin şekli, büyüklüğü, akışkan ortamın viskozitesi ve yoğunluğuda önemli rol oynamaktadır[11].

Ağır metalleri hafiflerinden ayırmak için kullanılan birkaç yöntem vardır. Ayırmanın temeli bileşenlerin yoğunluk farkıdır. Tablo 3.3.'de metal ve metal olmayan malzemelerin ayrımında yaygın olarak kullanılan yoğunluk farkına göre ayırma yöntemleri bulunmaktadır[6].

Yoğunluğa göre ayırma farklı metallerin özgül ağırlıklarının birbirinden farklı olması prensibine dayanır. Ayırma işlemi farklı özgül ağırlığa sahip malzemelerin yerçekemine ve içerisinde bulundukları akışkan (hava, su vs.) içerisinde harekete karşı olan dirençlerine bağlı olarak gerçekleşir[6].

Yoğunluk farkına göre ayırımda genellikle üç çeşit ağır ortam kullanılmaktadır[11].

- Tuzların sudaki çözeltileri ($CaCl_2$, $ZnCl_2$
- Organik sıvılar (Bromorform, Metilen İodür, Trikloretilen v.s.)
- Katıların su içindeki süspansiyonu (Ferrosilikon, manyetit, barit)

Tablo 3.3: Yoğunluk farkına göre ayırım yöntemleri

Yoğunluk farkına göre ayırım Prosesleri	Elverişli Tane boyutu	Hurdaların sınıflandırma sonrası kalan kısımları					
		Plastik Hurdası	Alumin. Hurdası	Kurşun Pil Hurdası	Kablo Hurdası	Elektronik Hurda	Hafif Çelik Hurdası
Yüzdürme seper.							
Sıvı içinde		+		+	+		+
Ağır ortamda							
AğırlıkAyırıcı	5–150		+	+		+	+
Hidro siklon	<50						+
Hava akımında							
Hava Kanalı	0.7–3				+		
Akışkan yatak	0.7–5				+		
Sallama ileAyırma							
Hidrolik Sallantı	2–20						+
Pnömatik Sallantı	<3				+		
Masa üzerindeki kanal ile ayırma							
Hava kanalı	0.6–2				+		
Hava masası	<4				+		
Yukarı akış ayrımı							
Hidrolik yukarı akış ayrımı	5–150	+		+			+
Pnömatik yukarı akış ayrımı	<300				+		

4. KONUYLA İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Elektronik hurdalardaki baskı devreleri çok komponentli olmaları ve tüm parçalarında genellikle farklı malzemelerden oluşması sebebiyle geri kazanımda büyük bir problem teşkil etmektedir. Baskı devrelerinin geri kazanılması ile ilgili firmalar tarafından birçok prosesler geliştirilmiştir ve halen geliştirilmektedir. Baskı devrelerin değerlendirilmek üzere hazırlanabilmesi öncelikle eski cihazlardan demonte edilmesi ve zararlı maddelerden uzaklaştırılması ile gerçekleştirilebilmektedir.

Demontaj: Eski cihazlar öncelikle el işçiliği ile veya kısmen mekanik şekilde çeşitli fraksiyonlara ayrılmaktadır. Bunlar; Kılıf (Metal / Plastik Ayımı), Kablo, Devre, Televizyon Tüpleri, Motorlar, Zararlı Bileşikler (Piller, kondansatörler v.s.).

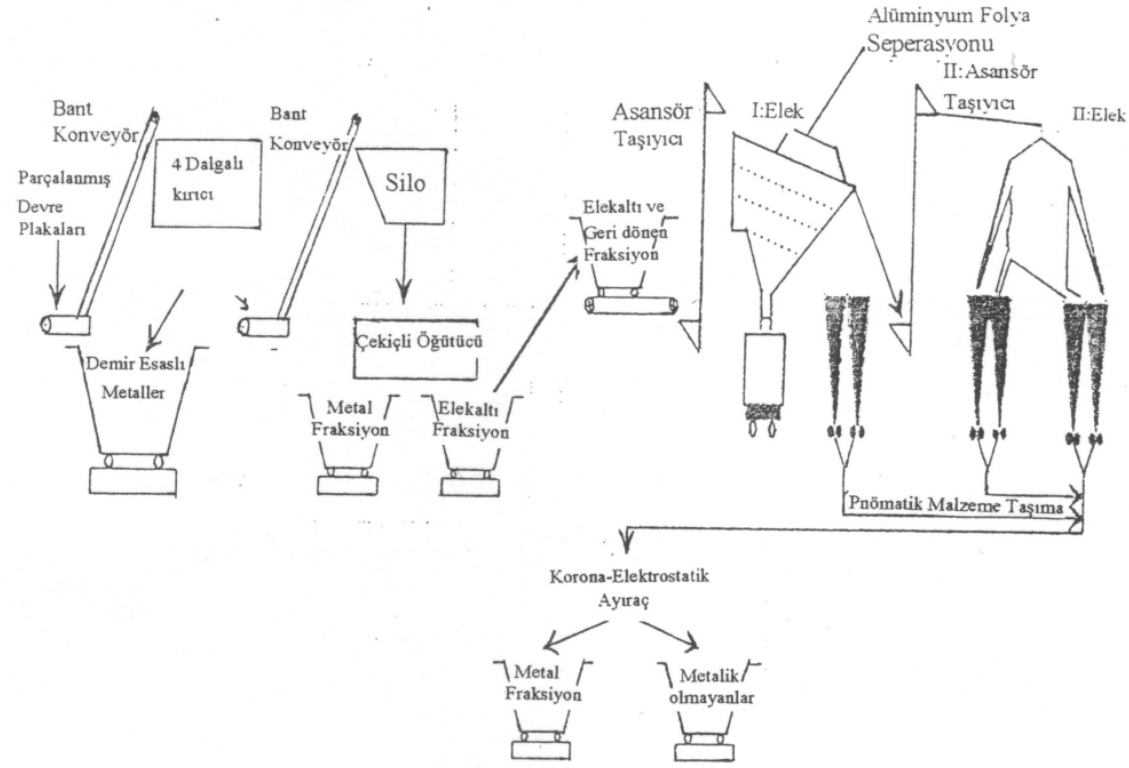
Parçalanmış eski cihazlardaki kullanıma elverişli olan komponontler demonte edilerek kontrolden geçirilir. Daha sonra örneğin motorlar, transformatörlerveya bazı elektronik yapı parçaları gibi yedek parça veya değiş-tokuş komponenti olarak pazara sunulur. Tekrar kullanımı mümkün olmayan fakat değerli malzeme potansiyeline sahip parçalar geri dönüşüme tabi tutulup ekonomik değer taşıyan kısımlar farklı formlarda pazara sunulmaktadır. Buna karşın demonte edilmiş kısımlardan ekonomik değeri olmayan yapı parçaları ve çevreye zararlı maddeler çevresel kanun ve yönetmeliklere göre uygun bir şekilde bertaraf edilmektedir. Baskı devrelerinin işlenmesinde mekanik hazırlanma işleminden önce zararlı madde içeren komponentler (piller ve PCB içeren kondansatörler) el işçiliği ile ayrılmak zorundadır. Çünkü parçalanma işleminde toksik maddeler oluşabilmekte ve toksik oluşturucu maddeler metalik fraksiyonlara karışabilmektedir. Optimum parçalama koşullarına bağlı olarak altın kaplı iletkenler gibi değerli madde içeren komponentler özel bir işleme tabi tutulmak için ayrılırlar[2].

Baskı devrelerinin geri kazanımında günümüz çevre standartlarına uygun ve çevre sağlığı açısından sorun yaratmayan bir biçimde işlenmesini öngören ekonomik bir

proses yoktur. Bugüne kadar uygulanan yöntemlerde karşılaşılan temel problemler şunlardır;

- Parçalanma prosesinde ihtiyaç duyulan yüksek sıcaklıklar
- Metalik değerlerin düşük verimli geri kazanımı
- Zararlı maddelerin ve toksik oluşturucuların değerlendirilebilir fraksiyonlardan yeterli seviyede uzaklaştırılamaması.

Metalik fraksiyonlarla birlikte bulunan nispeten yüksek oranlardaki plastikler, bromlu bileşikler geri dönüşüm malzemelerinin kirlenmesine yol açmaktadır ve ergitme esnasında dioksinler ve furan gibi zararlı maddeler teşekkül ederler. Baskı devrelerinin geri kazanımı tekniklerinde bu parametreler özellikle dikkate alınmalıdır[2].



Şekil 4.1: Daimler-Benz Yöntemi

Daimler Benz A.G. firması 1994 yılında Ulm'deki araştırma merkezinde baskı devre hurdalarının geri kazanımı için bir proses geliştirmiştir. Pilot tesis 1995 yılında kurulmuş olup 1996 yılı başlarında optimizasyon çalışmaları için faaliyete geçirilmiştir. Bu tesisin kapasitesi 50 kg/saat' dir. Şekil 4.1. de pilot tesisin çalışma prensibi görülmektedir[2].

Daimler Benz tarafından geliştirilen bu prosesin çalışma adımları şu şekildedir:

Ön kırma: Baskı devre plakaları zararlı maddelerden arıtıldıktan sonra, dört helezonlu kırıcı kullanılarak -20 mm'lik parça boyutuna indirilmiştir[2].

Fe Ayrımı (İri Boyutlu): Ön parçalama işleminden sonra malzeme manyetik ayırıcıdan geçirilerek demir esaslı komponentler büyük oranda giderilmiştir[2].

Azot ile Soğutma: Prosesin bu adımında parçalanmış baskı devresi soğutma kolonunda sıvı azot ve hava karışımı püskürtmesiyle gevreklik noktasının altına soğutulan karışımda çelik ve plastik gevrekleşirken, bakırın ve aluminyumun sadece sertliği artmıştır. Bunun yanında bağlayıcı malzemenin içindeki termik gerilimlerin sonraki serbestleşme adımını kolaylaştırdığı tespit edilmiştir[2].

Selektif Parçalama: Soğutulmuş karışım, özel olarak imal edilmiş çekiçli değirmende selektif olarak boyut küçültme işlemine tabi tutulmuştur. Düşük kırılma mukavemetine sahip olan plastikler, cam, fiber malzemeler hızla ufalanırken, küçük metal partiküllerinde oluşan ince fraksiyon bir elek yardımıyla öğütücü ortamdan kolaylıkla ayrılmıştır. Ayrılan kısım kondansatörlerden gelen Al ağırlıklı fraksiyondur[2].

Ağır Fraksiyonların Sınıflandırılması (> 0,63 mm.) : Ağır fraksiyon olarak ortaya çıkan kısım, ikinci bir elek makinası yardımıyla farklı fraksiyonlara ayrılmıştır. Proses adımlarında selektif ayırma için elek açıklıklarının 0,63 – 1 mm, 1 – 1,6 mm, 1,6 – 2.5 mm. ve 2.5 mm.'den büyük olması pratikte belirlenmiştir[2].

Metal – Plastik Ayrımı (Korona Elektrostatik Ayırıcı) : Her iki elek makinesindan gelen fraksiyonlar, iki kademeli Korona Elektrostatik Ayırıcısı yardımıyla metal-plastik ayırım işlemine tabi tutulmuştur. Korona Elektrostatik Ayırıcının sınıflandırma özelliği her fraksiyona ve parça boyut dağılımına göre ayarlanabilmektedir. Korona Elektrostatik Ayırıcının birinci kademesinde ortaya çıkan karışık fraksiyon ikinci kademede ayrılırken bu kademenin karışık fraksiyonu miktar ve saflık oranına göre ya plastik fraksiyona ya da tekrar prosese geri döndürülmüştür. Korona Elektrostatik Ayırıcının en büyük dezavantajı ayrım özelliğinin sıcaklık, nem gibi ortam şartlarına bağımlı olması yani tekrarlılık özelliğinin olmamasıdır. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için çalışma ortamının ve

beslenen malzemenin nem oranın sabit tutabilmek amacıyla sistemin ilave bir düzenek ile belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılması gerekmiştir[2].

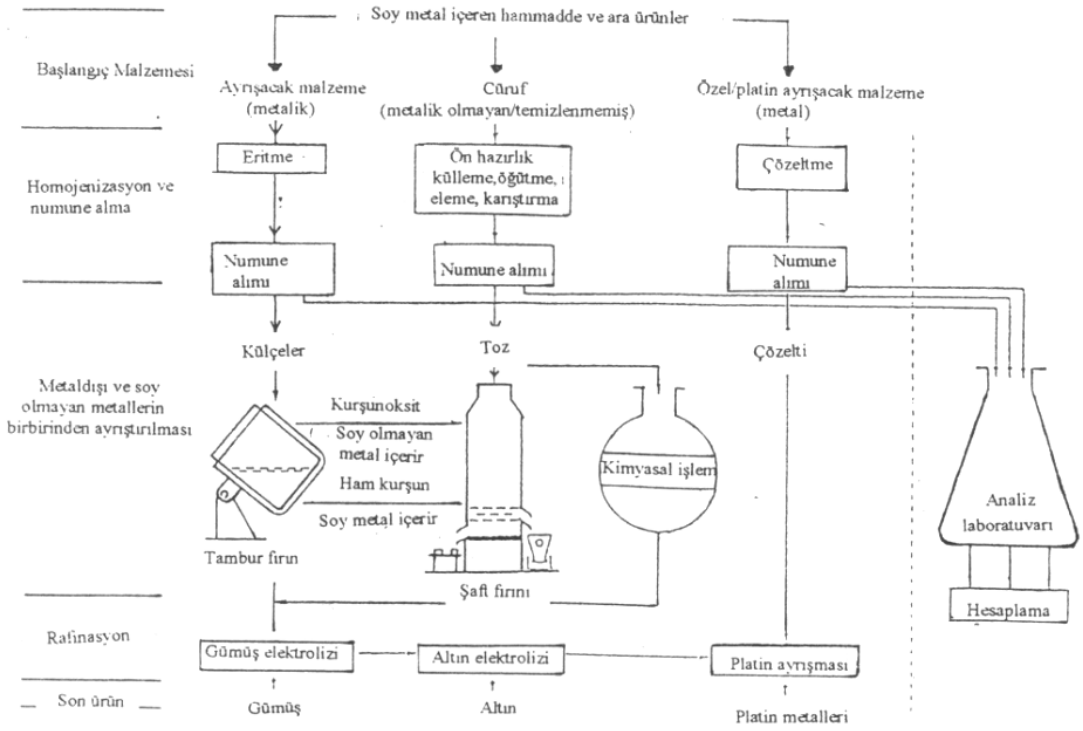
Daimler Benz A.G. tarafından baskı devre plakalarının geri kazanılması ile ilgili geliştirilen bu yöntemin avantajları;

- Yüksek saflıkta atık elde etmişlerdir.
- Proseste daha düşük emisyon sağlanabilmiştir. Selektif olarak gerçekleştirilen kırma, öğütme olayları esnasındaki düşük sıcaklıkla dioksin ve furan gibi zararlı maddelerin oluşumu engellenmiştir. Zehirli madde probleminin önemli ölçüde azaltılabilmiştir.
- Geri kazanılan metal fraksiyonunun selektivitesinin (% Metal) diğer yöntemlere kıyasla yüksek olması ve ilave olarak düşük orandaki atık miktarı ile geri döndürülen metalin ergitilmesi sırasında oluşan zararlı atık emisyonu da (dioksin ve furan) minimize edilmiştir.
- Atık fraksiyonundaki metal oranı termik işlem sırasında yüksek volaliteye sahip metal bileşiklerinin oluşmasına neden olmuş ve bu bileşikler katalizörlerin ömrünü ve katalitik özelliklerini azaltmıştır. Geliştirilen bu proseste ortaya çıkan atık düşük oranda metalik değer içerdiğinden dolayı bu problemde önemli ölçüde ortadan kalkmıştır.
- Bu yöntem geliştirilmiş olan diğer yöntemlere kıyasla daha az proses adımı içermektedir, dolayısıyla uygulanması daha kolay bir yöntemdir.

Baskı devrelerinin geri kazanılması konusunda W.C. HERAUS GmbH firmasının da çalışmaları bulunmaktadır. W.C. HERAUS firması çok sayıda soy metal içeren atık ve artık maddeler işlemiştir. Elektronik hurdaların yanı sıra kalın tabakalama teknolojisinden pastalar ve elektronik endüstrisinin üretim atıkları (baskı devreleri, SMD devreleri-inşa grupları, hibrid devreler, Reed kontaktları, şalterler v.b.) katalizörler, kuyumculuk ve dişçilik malzemeleri, sikkeler, madalyalar kabul edilmiştir[2].

Geri Kazanım Masrafları ve İşlemleri: Hemen hemen bütün cihaz türlerinin geri dönüşümünde masraflar meydana gelmiştir. Kimi fraksiyonların satışıyla bir gelir elde edilmiştir. Bu her şeyden önce metaller için ama aynı zamanda yüksek metal oranına sahip baskı devreler için geçerli olmuştur[2].

Numune Alımı: Hurdalar satın alınmış ve ücret hesaplamasından düşülmüştür. Hurdaların hazırlanmasından önce uygulamalı bir denemede soy metal içeriği tespit edilmiş ve malzeme içerisinden ilgili numunenin alınması için malzeme homojenize edilmiştir. Plastik madde içeren baskı devre hurdaları burada iki aşamalı bir işleme tabi tutulmuş, malzemenin yaklaşık %10'u deneme için alınmış ve kül haline gelene kadar yakılmıştır. Kül halinde yakma işlemi 800 ^{0}C üzeri bir sıcaklıktaki fırında gerçekleştirilmiştir. Metallerden ve kül haline gelemeyen yan maddelerden (seramik, cam, elyaf v.b.) oluşan karışım eritilmiş, curuf çekilmiş ve metal fraksiyon, soy metal içeriğinin tespit edildiği numunelerin alınacağı ve analiz edileceği külçeler halinde dökülmüştür[2].



Şekil 4.2: HERAUS' un soy metal geri dönüşümü

Denemeden sonra metal üretime gelmiş ve pirometalurjik, hidrometalurjik ve elektrokimyasal aşamalardan geçirilmiştir. Şekil 4.2.' de soy metal geri dönüşümünde uygulanan işlemler gösterilmiştir.

Termik Ön İşlem: Pirometalurjide HERAUS geçici olarak pirolizi takip eden son kül halinde yakma işlemini devreye sokmuştur. Burada elde edilen metal müteakip hidrometalurjik işlem için granül haline getirmiştir. Altın suyu ayrımı gibi standart

işlem süreçlerinin yanı sıra klor oksidasyon gibi modern süreçleri de uygulanmıştır. Bakır içeren artıklar ticarete uygun hammaddeler üretilmesi için bakır işletmelerine teslim edilmiştir[2].

Rafinasyon: Hidrometalurjiden çıkan ham metallerin rafinasyonundan min. %99,95 saflıkta tanecik ve külçe halinde altın, gümüş, levha veya külçe halinde paladyum ve platin elde edilmiştir. Rutenyum, rodyum, iridyum ve osmiyum tozlarında ise min. %99,9 oranı elde edilmiştir.

Soy Metallerin Geri Kazanımı: Soy metallerin yeniden geri kazanım payı, çok önemli oranlarda kullanılan malzemenin yapısına, bunun soy metal içeriğine ve soy metal türüne bağlıdır. Daha yüksek soy metal içeriklerinde pirometalurjik işlem aşamalarından, curuflardan ve hidrometalurjik işlem aşamalarından, çamurlardan % 95 oranlarında bir yeniden kazanım elde edilmiştir. Atık gazlar ve nötralizasyonlar içerdikleri maddelere göre özel atık yerlerine ve olağan çöp depolama yerlerine götürülmüştür [2].

H.M. Veit ve arkadaşları bilgisayarlarda kullanılan baskı devrelerinin içindeki metallerin manyetik ve elektrostatik ayrıma ek olarak kırma ve eleme gibi mekanik işlemlerle geri kazanılması konusunda çalışmışlardır. Kullandıkları baskı devrelerindeki bakır miktarını % 12.5 olarak bulmuşlardır. Bununla birlikte %4 kalay ve % 2.7 kurşun bulmuşlardır. İlk olarak partikül boyutu 1mm.' nin altına inene kadar kırma işlemine tabi tutmuşlardır. Kırma işleminden çıkan baskı devrelerine manyetik ayırım işlemi uygulanmıştır. Manyetik ayrımdan bir sonraki adımda ise elektrostatik ayrım yapılmıştır. Manyetik ayırma işlemi sonrasında baskı devrelerinde bulunan demirin % 43' ünün ayrıldığını tespit etmişlerdir. Elektrostatik ayrım ile ayrılanların % 50' sinin bakır, % 25'nin kalay ve % 8'inin kurşun olduğunu tespit etmişlerdir[1].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu deneylerde elektrik elektronik ekipman hurdalarının geri kazanımına yönelik ön işlemler için fırın tasarımı yapılarak, kırma, öğütme, eleme, manyetik ayrım ve yoğunluk farkına göre ayrım gibi yöntemlerle metal-plastik komponentlerin birbirinden ayrılması ve uygulanan yöntemlerin proses parametrelerinin optimizasyonu amaçlanmıştır. Bu amaca uygun olarak baskılı devreler ve bilgisayar işlemciler üzerinde ayrı ayrı deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İşlemcilerin ayrı olarak incelenmesinin nedeni endüstride de işlemcilerin içerdiği yüksek altın miktarından dolayı ayrı olarak direkt olarak altın geri kazanımına uygun işlenmesidir.

5.1. Deneylerde Kullanılan Başlangıç Malzemeleri

Yapılan deneylerde bilgisayar boardları yani baskı devreleri ve işlemciler kullanılmıştır. Bölüm 5.2 ve Bölüm 5.3'te baskılı devreler ve işlemciler ile ilgili olarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalar tanımlanmıştır.

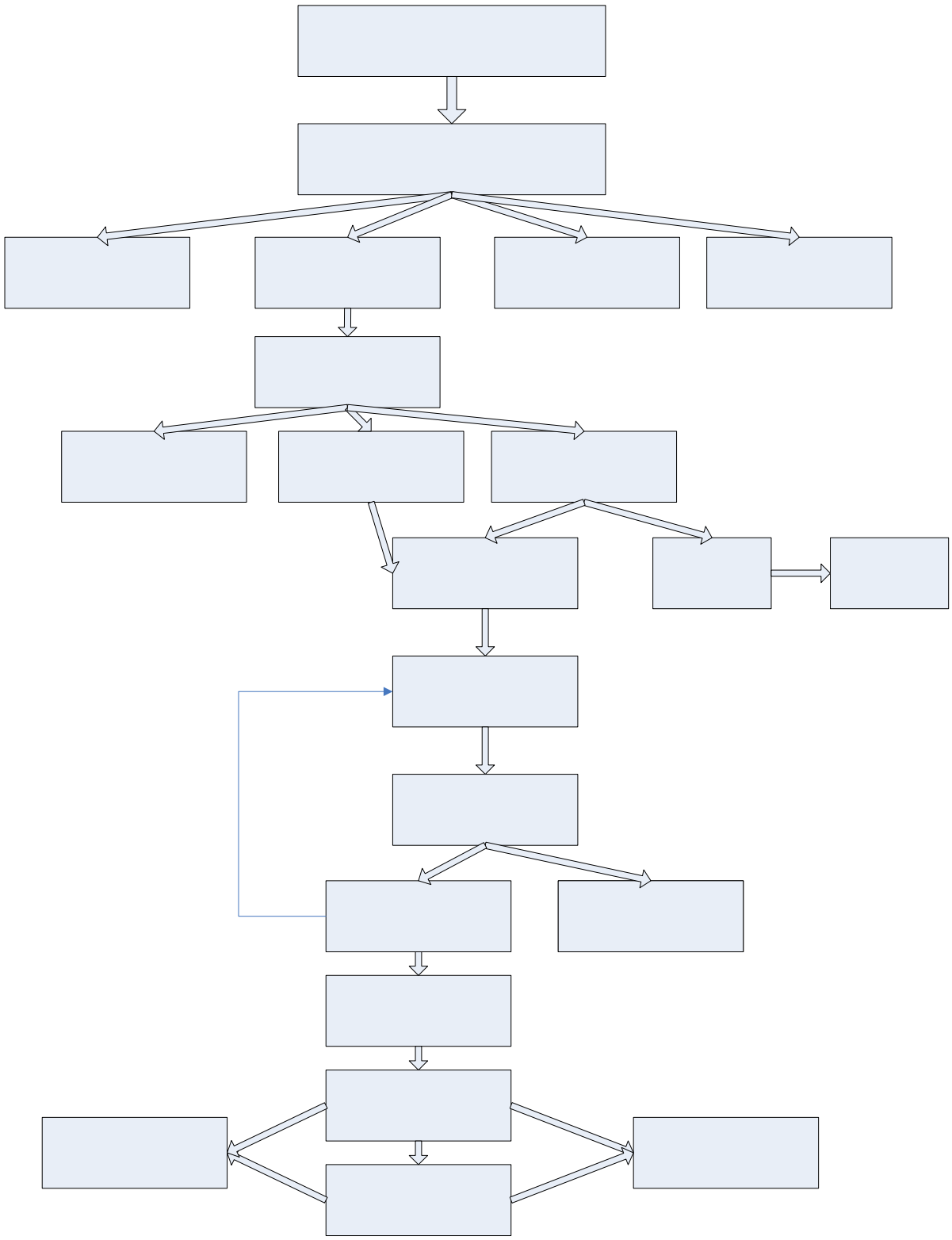
Deneysel çalışmalarda kullanılan baskılı devrenin içerdiği metalik değerlerin ve plastiklerin dağılımı

Bakır= %20.57, Kalay = %3.59 , Aluminyum = %2.12, Kurşun = %1.62, Demir = % 0.64, Nikel = % 0.098, Altın = % 0.011, Kobalt = % 0.0051, yaklaşık olarak % 71'lik kısım plastik esaslı malzemeler ve eser miktarda bulunan elementlerdir.

5.2. Baskı Devresi Deneyleri

Baskı devreler ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda uygulanan işlem adımları Şekil 5.1'de görülmektedir. Elde edilen hurdalar elle demonte edildikten sonra, tasarımı ve imalatı laboratuvarda yapılan lehim alma fırınında ısıtılmış ve mevcut lehimlerin baskılı devreden ayrılması sağlanmıştır. Daha sonra baskılı devreler

sırasyıla kırma, öğütme, manyetik ayrım, eleme ve yüzdürme işlem adımlarından geçirilmiştir.



Şekil 5.1: Baskılı devrelere uygulanan işlem adımları Kasa

5.2.1. Deneylerde Kullanılan Cihazlar

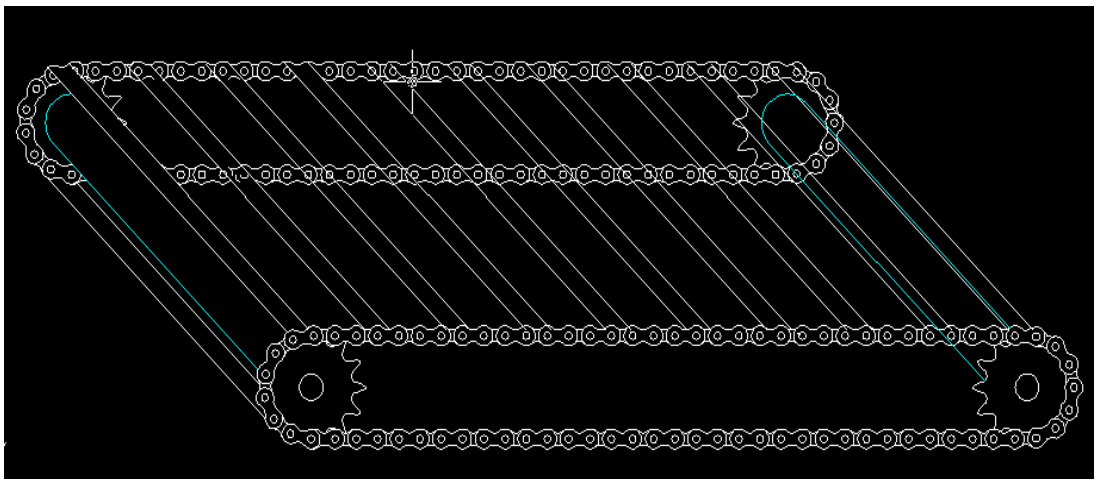
Deneyler esnasında bir adet konveyor bantlı fırın, bir adet Kırma-kesme makinası, bir adet öğütücü değirmen ve bir adet manyetik ayırma cihazı kullanılmıştır. Lehim alma işlemi için kullanılan fırının tasarımı ve imalatı bölüm laboratuvarlarında elektronik hurdaların işlenmesine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Fırın tasarım ve üretim süreçlerinin detayları aşağıda verilmiştir.

Lehim sökme işlemi için Şekil 5.2.' de yapım aşaması fotoğrafları görülen bir fırın yapımına başlanmıştır. Öncelikle fırının kasası hazırlanmış ve bunun içinde 30x30x2 mm boyutlarında profiller kullanılmıştır. Profillerin iki yüzüne 2 mm. sac döşendikten sonra sac katmanların arasına ısı yalıtımını sağlamak için kevlar döşenmiş ve rezistansların fırına bağlantı delikleri açılmıştır. Bu delikler rezistansların fırını homojen ısıtabileceği şekilde yerlere delinmiştir. Kasası hazırlanan fırına gerekli ısıyı sağlamak için özel olarak her biri 2000 Watt olan 2 adet rezistans yaptırılmış, rezistansların fırında meydana getirdiği sıcaklığı kontrol altına almak ve fırının kaç derece sıcaklığa kadar çıkabildiğini görmek amacıyla fırına 0 ^{o}C-300 ^{o}C arasında çalışan bir adet termostat bağlanmıştır.



Şekil 5.2: Fırın Yapım aşaması fotoğrafları

Fırının en önemli kısımlarından biri konveyör bant şeklinde tasarlanan kısmı olup, konveyör bant görevini yerine getirmek için bir çift bisiklet zinciri kullanılmıştır. Fırının bir ucundan giren numunenin konveyör bant vasıtasıyla taşınması ve içerde belli süre kaldıktan sonra dışarı çıkması sağlanmıştır.

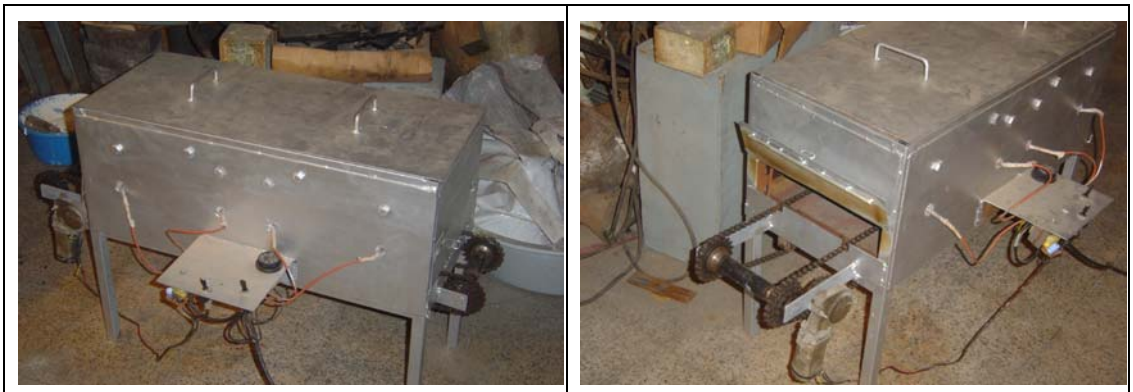


Şekil 5.3: Fırındaki konveyör sisteminin teknik çizimi

Bisiklet zincirleri bir çift boruya diş çekilerek bağlanmış olan dişli çarklara takılmış ve bu zincire hareket verme görevi ise bir motor vasıtasıyla sağlanmıştır. Zinciri hareket ettirecek motor için arabalarda bulunan silecek motoru kullanılmış ve aynı zamanda silecek motorunun kullanılmasıyla motorun kendi üzerinde bulunan devir değiştirme özelliğiyle zincirin hareket hızını da değiştirme olanağı sağlanmıştır.

İçerde kaldığı süre içersinde baskı devrelerinin lehiminden ve lehimle bağlı olan parçalarından ayrılması planlanmıştır.

Fırının içersinde zincirin alt kısmında sıcaklıkla eriyen lehimi almak içinde bir tepsi yapılmış, lehimi alınan ve lehimle bağlı olan parçaları ayrılan numune fırından dışarı alınmıştır.



Şekil 5.4: Fırının bitmiş haldeki fotoğrafları

Kırma kesme deneyleri 260 mm. rotor çapına sahip bir kırma kesme makinesi ile yapılmıştır. Kırma kesme makinesinin huni genişliği 500x480 mm. ebatlarında olup saatte 200-450 kg. malzeme yükleme kapasitesi ile çalışmaktadır. Kırma kesme makinesinde kullanılan bıçaklar takım çeliği olup, makinede seçilen elek aralığına göre malzeme kırmak mümkündür.



Şekil 5.5: Kırma makinesinin ve bıçaklarının fotoğrafları

Kırılan numunelerin öğütülmesi için Siebtechnic marka WC esaslı labaratuar ölçekli halkalı öğütücü kullanılmıştır.

Öğütülen numunelerden manyetik olan demir-nikel-kobalt grubu metalleri alabilmek için manyetik ayırma cihazı kullanılmıştır. Cihazın üst kısmında titreşim ile numunelerin hareket etmesini kolaylaştıran bir tepsi bulunmaktadır. Tepsiye verilen titreşimin frekansı ile malzemelerin hareket hızı ayarlanabilmiştir. Titreşim vasıtasıyla hareket eden malzemeler bir kısmı manyetik olan bir tamburun üzerine düşmüştür. Tamburun hızıda cihaz üzerindeki bir düğme ile ayarlanabilmekte ve tamburun hızının düşük olması tepsiden akan malzemenin fırlamaması daha hassas manyetik metal ayrımı ve manyetik metal kaybının azalması açısından önemli oldugu tespit edilmiştir. Tamburun manyetik kısmından ve manyetik olmayan kısmından aşağı malzemeler iki ayrı yere dökülerek ayrılmaktadır. Böylece manyetik ve manyetik olmayan metaller birbirinden ayrılmış olmaktadır.

5.2.2. Yapılan İşlemler

5.2.2.1.Demontaj

Endüstriden temin edilen elektronik hurdalar önce sınıflandırıldıktan sonra demontaj işlemine tabi tutulmuştur. Demontaj sonrasında kasa, baskı devreler, kablolar ve piller olmak üzere 4 ana sınıf oluşmuştur. Deneylerde kullanılan kısım olan baskı devreleri ayrılmıştır ve deneylerde kullanılmak üzere toplanmıştır.

Daha sonra baskı devreleri kendi içinde bir demontaja daha tabi tutulmuştur. Baskı devrelerindeki zehirli maddelerin bulunduğu kısımlar, piller ve cıvata somun v.s. sökülmüştür.

Demontaj işleminden çıkan baskı devreleri lehim sökme işlemi için hazır duruma gelmiştir.

5.2.2.2.Lehim sökme işlemi

Bu çalışma prensibi altında fırının optimum çalışma verimini tespit etmek için bir dizi deney yapılmıştır. Demontaj işleminden gelen numuneler fırında belli sıcaklık ve

zamanlarda tutularak lehimin optimum ergime aralığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda baskı devrelerinde bulunan lehim miktarıda yüzde olarak tespit edilmiştir.

Öncelikle her bir deney için belirlenen çalışma sıcaklığında numuneler iki saat süreyle ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Fırının istenilen sıcaklığa ulaşmasından sonra numuneler fırın içerisinde Tablo 5.1.' de belirtilen sürelerde bekletilmiştir.

Tablo 5.1: Sıcaklık ve zamana göre baskı devresindeki lehim miktarında meydana gelen değişim

Sıcaklık (^{0}C)	**160-180**	**180-200**	**200-220**	**220-240**
Zaman (dak.)	10	10	10	10
	15	15	15	15
	20	20	20	20
	30	30	30	

Fırından çıkan her bir numunenin lehiminden kurtulup kurtulmadığı ve bununla birlikte lehimle bağlı olan parçaların numune (baskı devresi) üzerinden ayrılıp ayrılmadığı incelenmiştir.

5.2.2.3.Kırma işlemi

Lehim sökme işlemi sonrasında lehimlerinden ayrıştırılan baskı devreleri ve baskı devrelerine lehimle tutturulmuş parçalar kırma makinesine alınarak burada kırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kırma makinesinden çıkan numunelerin tane boyutlarının birbirine yakın olması için kırma makinesinin alt kısmına 5 mm. delik boyutunda bir elek konulmuştur. Kırma makinesinde 2dk. boyunca kırılan numuneler daha sonra kırma makinesinin alt kısmındaki hazneden alınmıştır.

5.2.2.4.Öğütme işlemi

Kırma işlemi sonunda elimizde bulunan 5 mm. boyutundaki kırılmış baskı devrelerinden öğütme işlemine girmek üzere numune alma yöntemlerine göre 5 ayrı numune alınmıştır. Bu beş ayrı numunenin de ağırlıkları 30 g. olarak ayarlanmış ve öğütme işlemlerine değişik sürelerde maruz kalmıştır.

Tablo 5.2: Baskı devrelerine uygulanan öğütme süreleri

1. numune 10 sn.	2. numune 20 sn.	3.numune 30 sn.
4. numune 1 dk.	5. numune 1,5 dk.	6. numune 2 dk.

5.2.2.5.Manyetik ayırma işlemi

Öğütme işleminden gelen 5 ayrı numuneye ayrı ayrı manyetik ayırma işlemi uygulanmıştır. Manyetik ayırma işlemi sonrasında manyetik olan kısım ve manyetik olmayan kısım olmak üzere iki ana kısım oluşmuştur.

5.2.2.6.Elek analizi

Manyetik ayırmadan geçirilen numuneler 3,35mm. – 2,36mm. – 1.40mm. – 1,00mm. – 0,5 mm. – 0,25 mm. – 0,1 mm. – 0,045 mm.elek aralıklarında eleklerle elek analizine tabi tutulmuştur.

5.2.2.7.Yoğunluk farkına göre ayırma

Elek analizinden sonra numunelere yoğunluk farkına göre ayırma işlemi uygulanmıştır. Yoğunluk farkına göre ayırma için elek analizinde en efektif dağılımı gösteren numune olduğu için 2 dakika öğütülen numune kullanılmıştır.

Yoğunluk farkına göre ayırma için ağır ortam ayırma yöntemi kullanılmıştır. Ağır ortam olarakta ferro silikon ile suyun karıştırılmasından oluşan bir süspansiyon hazırlanmıştır. Bu süspansiyon hazırlanmadan önce ferrosilikonun su ile iyi bir süspansiyon oluşturması için ferro silikon öğütme işlemine girmiştir. Ferro silikonun su ile verimli bir süspansiyon oluşturması yani ferro silikon taneciklerinin suda çökmeden yüzer pozisyonda kalabilmeleri için 40 μm'nin altında olmaları gerekmektedir. Bunun için ferro silikona değişen sürelerle öğütme işlemi uygulanmıştır[15].

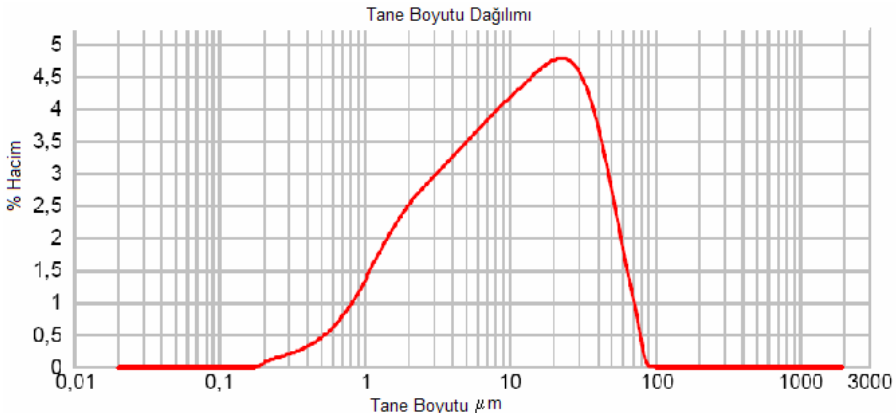
Ferro silikondan 5 ayrı numune alınmış ve bu numuneler sırasıyla 1-1,5-2-3-4 dak. öğütülmüştür. Öğütme işleminden sonra her bir ferro silikon numunesi partikül boyutu ölçüm cihazına girmiş ve dakikaya göre partikül boyutu dağılımları çıkarılmıştır Öğütme işlemi sonunda Şekil 5.6.'da görüldüğü gibi 4 dak. lık ferro

silikon numunesisnin 40 µm'nun altında olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle yoğunluk farkına göre ayırım deneylerinde 4 dak. öğütülmüş numune kullanılmıştır.

Parça boyutu dağılımlarına göre ve süspansiyonun başlangıç yoğunluğu 1,5 g/ml olacak şekilde ferro silikon ile su aşağıdaki hesaplamalarda görüldüğü gibi karıştırılmış ve yoğunluk farkına göre ayırımın yapılacağı süspansiyon elde edilmiştir.

$d = m/v$ d_1= Suyun yoğunluğu d_2= Ferro silikonun yoğunluğu

$$d_k = (d_1V_1 + d_2V_2) / (V_1+V_2)$$



Şekil 5.6: 4 dakika öğütülen ferro silikon numunesinin partikül analizi sonucunda ortaya çıkan tane boyutu dağılımı

5.3. İşlemci Deneyleri

Baskı devreleriyle yapılan deneylerin ardından toplam ağırlıkları 247,3 g. olan 11 adet işlemci içinde bir dizi deney yapılmıştır.

5.3.1. Öğütme Deneyi

İşlemciler manyetik ayrıma uygun olması açısından öğütme işlemine tabi tutumuştur. Öğütme işlemi için 2 dakikalık bir öğütme uygun görülmüştür.

5.3.2. Manyetik Ayırma İşlemi

Öğütülen işlemcilere manyetik ayırma işlemi uygulanmıştır. İşlemciler manyetik ayırma cihazından manyetik olan ve manyetik olmayan şeklinde iki kısıma

ayrılmıştır. Manyetik olan kısım ve manyetik olmayan kısım kendi içinde bir kez daha manyetik ayırmaya tabi tutulmuş ve daha sonra eşleştirmeler yapılarak manyetikler ve manyetik olmayanlar şeklinde ayrılmıştır.

5.3.3. Elek Analizi

Manyetik ayırma sonrasında manyetik kısımlar içersinde toz kısımlar görülmüştür. Bunların manyetik olmadığı mıknatıs yardımıyla tespit edilmiştir. Daha sonra manyetik ayırma işleminin efektif olmadığına karar verilmiş ve elek analizi yapılmıştır. Elek analizi manyetik ayırma işleminden çıkan manyetik kısma uygulanmış ve içersindeki tozlar alınmıştır. (Bir kısım toz daha sonra yıkanarak alınmıştır.)

6. DENEY SONUÇLARI VE İRDELEMELER

6.1. Baskı Devreleri Deney Sonuçları ve İrdelemeleri

Bu bölümde baskı devresi ile ilgili yapılan deneylerin sonuçları ve bu deneylerle ilgili irdelemeler bulunmaktadır.

6.1.1. Demontaj İşlemi Sonuçları

Deneylerde kullanılmak üzere alınan baskı devrelerinin demontaja girmeden önceki ve demontaj sonrası ağırlıkları Tablo 6.1.' de görülmektedir.

Tablo 6.1: Demontaj öncesi ve sonrası ağırlık değişimi

Manuel Demontaj öncesi numunenin toplam ağırlığı	3024,5 g.
Manuel Demontaj sonrası fırına girecek olan numunenin toplam ağırğı	2967,3 g.

3024,5 = 2967,3 + Zararlı Maddeler (Vida, somun, cıvata, metalik soket başlıkları ve piller)

Zararlı Maddeler: 57,2 g.

6.1.2. Lehim Sökme İşlemi Deney Sonuçları

Lehim sökme işlemi sonrasında fırının optimum çalışma aralığı bulunmuştur. Aynı zamanda Tablo 6.2.' de görüldüğü gibi baskı devresindeki lehim miktarı tespit edilmiştir.

Tablo 6.2: Lehim Sökme İşlemi Sonucunda Elde Edilen Değerler

Manuel Demontaj sonrası fırına girecek olan numunenin toplam ağırğı	2967,3 g.
Fırına girdikten sonraki numunenin toplam ağırlığı	2908,2 g.
Fırına giren numuneden alınan lehimin ağırlığı	51,9 g.

2967,3 = 2908,2 + 51,9 + Buharlaşan Reçine

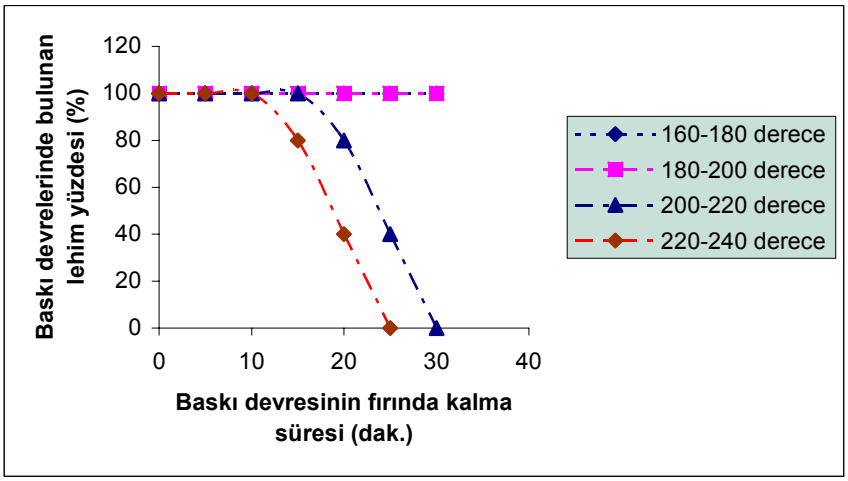
Buharlaşan Reçine = 7,2 g.

Deneylerde en uygun sıcaklık ve en uygun süre (fırın içinde kalma süresi) tespit edilmiştir. Yapılan deneyler sonucu aşağıdaki veriler elde edilmiştir.

Tablo 6.3: Sıcaklık ve zamana göre baskı devresindeki lehim miktarında meydana gelen değişim

Sıcaklık(^{0}C)	**160-180**	**180-200**	**200-220**	**220-240**
Zaman(dak.)	10	10	10	10
	15	15	15	15
	20	20	20	20**
	30	30	30*	30

* ile belirtilen dakikada lehim ergimeye başlamıştır. Reçinede herhangi bir buharlaşma meydana gelmemektedir bu nedenle bu sıcaklık aralığı uygun sıcaklık aralığı olarak kabul edilmiştir. ** ile belirtilen dakikada ve sıcaklık aralığında baskı devresindeki lehimin ergimeye başladığı tespit edilmiş fakat bu şartlarda baskı devresindeki reçinede buharlaştığı için bu sıcaklık aralığı çevresel faktörler nedeniyle tercih edilmememiştir. Tablo 6.3.'de ve Şekil 6.1.' de sıcaklık ve zamana göre baskı devesindeki lehim miktarındaki değişim grafiği çizilmiştir.



Şekil 6.1: Sıcaklık ve zamana göre baskı devresindeki lehim miktarında meydana gelen % değişim

Ayrıca bir baskı devresinde yüzde olarak ne kadar lehim bulunduğunun yaklaşık olarak belirlenmesi için bir baskı devresi fırına sokulmuştur ve Tablo 6.4.' deki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 6.4: Fırına sokulan bir baskı devresinin ağırlık dağılımı

Numunenin başlangıçtaki ağırlığı	460,3 g
Demontaj sonrası fırına giren numunenin ağırlığı	446,2 g
Fırından çıkan numunenin ağırlığı	188,9 g
Numuneye lehimle bağlı olan parçaların ağırlığı	250,9 g
Numuneden elde edilen lehimin ağırlığı	5,2 g

Yukarıdaki değerlerden de görüldüğü gibi fırına giren numuneden elde edilen lehim numunenin yaklaşık % 1,17'si civarındadır.

Numuneden alınan lehim analiz laboratuvarına gönderilmiştir. Analiz sonuçlarına göre numunedeki lehimin bileşimi;

Kurşun (Pb) %36

Kalay (Sn) %64

6.1.3. Kırma İşlemi Deney Sonuçları

Literatürde belirtilen 5mm. boyutundaki kırma işlemi Bölüm 5.2.1'de gösterilen kırma makinası kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

6.1.4. Öğütme İşlemi

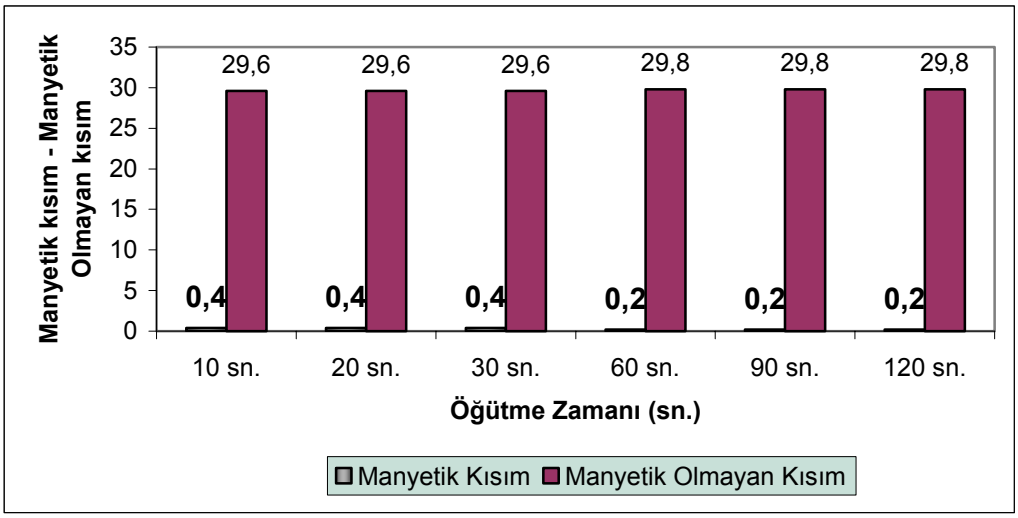
Baskı devreleri 6 ayrı sürede öğütülmüş ve numuneler manyetik ayırma işlemi için hazır konuma getirilmiştir. Farklı öğütmenin etkileri elek analizi Bölüm 6.1.6' da gösterilmiştir.

6.1.5. Manyetik Ayrma İşlemi Deney Sonuçları

Öğütme zamanına bağlı manyetik ayırma miktarları Tablo 6.5.' de ve Şekil 6.2.' de görüldüğü üzere öğütme zamanına bağlı manyetik ayırma miktarlarında pek fazla bir değişiklik olmamıştır. Bu da manyetik ayırmanın öğütme zamanıyla alakalı olmadığını göstermiştir.

Tablo 6.5: Zamana bağlı Manyetik Ayırma Deney Sonuçları

	Manyetik Kısım	Manyetik Olmayan Kısım
10 sn'lik numune	0,4 g.	29,6 g
20 sn'lik numune	0,4 g	29,6 g
30 sn'lik numune	0,4 g	29,6 g
1 dak'lık numune	0,2 g	29,8 g
1,5 dak.'lık numune	0,2 g	29,8 g
2 dak.'lık numune	0,2 g	29,8 g



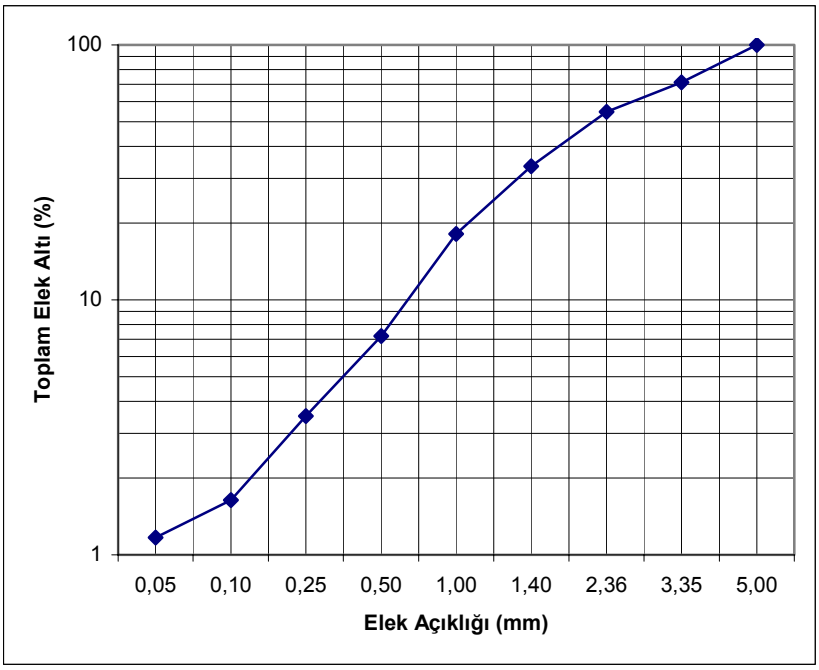
Şekil 6.2: Baskı devrelerinde öğütme zamanına göre manyetik-manyetik olmayan kısım dağılımı

6.1.6. Elek Analizi Sonuçları

Tablo 5.2.'de verilen öğütme işlemlerinin ardından elde edilen numunelerin elek analizleri gerçekleştirilmiştir. Elek analizinde elde edilen veriler Şekil 6.3.'de belirtilmiştir.

Tablo 6.6: Tamamı 15 sn süresince 5 mm Altına Öğütülmüş Numunenin Elek Analizi Sonuçları

Boyut Aralığı, mm	Miktar, %	∑ Elek Üstü, %	∑ Elek Altı, %
-5,00+3,35	28,60	28,60	100,00
-3,35+2,36	16,74	45,34	71,4
-2,36+1,40	21,16	66,50	54,66
-1,40+1,00	15,35	81,85	33,5
-1,00+0,50	10,93	92,78	18,15
-0,50+0,25	3,72	96,50	7,22
-0,25+0,10	1,86	98,36	3,5
-0,10+0,045	0,47	98,83	1,64
-0,045	1,16	100,00	1,17
Toplam	100,00		

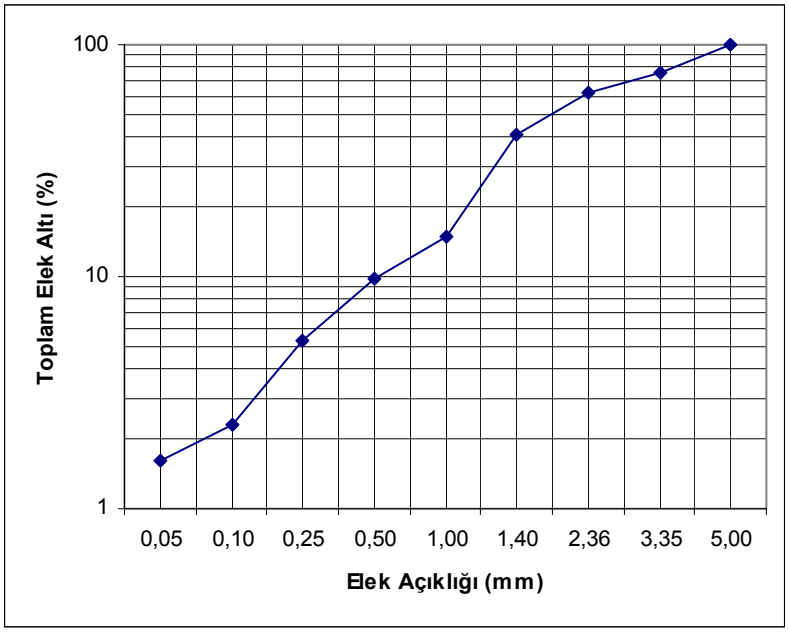


Şekil 6.3. 15 sn süresince öğütme işlemi uygulanan baskı devresinin elek analizi sonucundaki tane boyutu dağılımı

15 sn. lik öğütme sonrasında tane boyutu dağılımının 3,35 mm. – 2,36 mm. – 1,4 mm. ve 1 mm. üstü eleklerde olduğu görülmüştür. Yaklaşık %30' luk kısım 3,35 mm'nin üzerinde ve %83' lük bir kısımında 1mm. tane boyutunun üzerinde olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 6.7: Tamamı 30 sn süresince 5 mm Altına Öğütülmüş Numunenin Elek Analizi Sonuçları

Boyut Aralığı, mm	Miktar, %	∑ Elek Üstü, %	∑ Elek Altı, %
-5,00+3,35	24,07	24,07	100,00
-3,35+2,36	14,35	38,42	75,93
-2,36+1,40	20,37	58,79	61,58
-1,40+1,00	16,44	85,23	41,21
-1,00+0,50	15,05	90,28	14,77
-0,50+0,25	4,40	94,68	9,72
-0,25+0,10	3,01	97,69	5,32
-0,10+0,045	0,69	98,38	2,31
-0,045	1,62	100,00	1,62
Toplam	100,00		

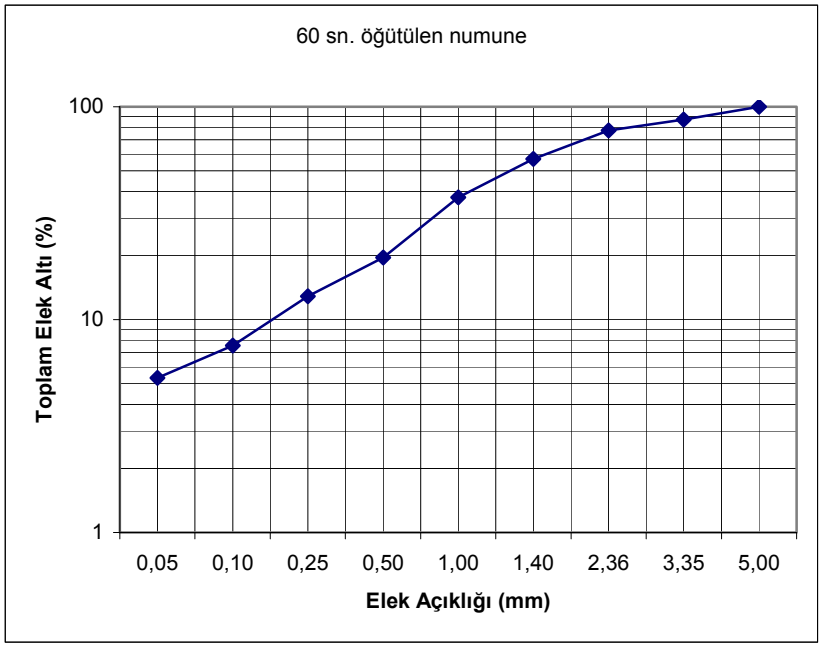


Şekil 6.4: 30 sn. süresince öğütme işlemi uygulanan baskı devresinin elek analizi sonucundaki tane boyutu dağılımı

30 sn boyunca öğütme işlemi uygulanan numunede ise tane boyutundaki dağılım yine büyük tane boyutlu olmakla beraber 0,5 mm. üzerindeki tane boyutunda yüzdesel oranda bir artış görülmüştür. %90'lık bir kısmın 0,5 mm. üstünde olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 6.8: Tamamı 60 sn süresince 5 mm Altına Öğütülmüş Numunenin Elek Analizi Sonuçları

Boyut Aralığı, mm	Miktar, %	∑ Elek Üstü, %	∑ Elek Altı, %
-5,00+3,35	12,89	12,89	100,00
-3,35+2,36	9,80	22,69	87,11
-2,36+1,40	20,45	43,14	77,31
-1,40+1,00	19,33	62,47	56,86
-1,00+0,50	17,93	80,40	37,53
-0,50+0,25	6,72	87,12	19,6
-0,25+0,10	5,32	92,44	12,88
-0,10+0,045	2,24	94,68	7,56
-0,045	5,32	100,00	5,32
Toplam	100,00		

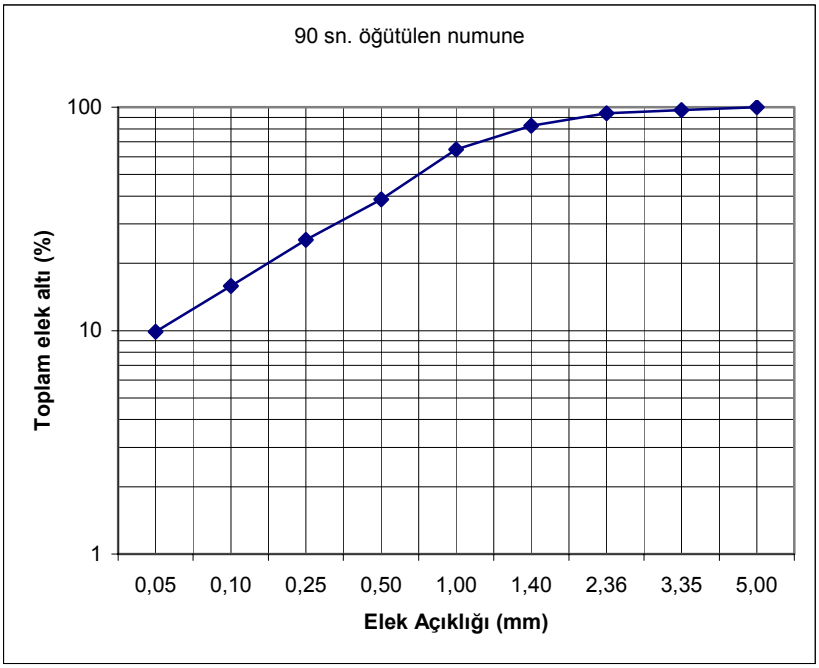


Şekil 6.5: 60 sn. süresince öğütme işlemi uygulanan baskı devresinin elek analizi sonucundaki tane boyutu dağılımı

60 sn. ğütme işlemi uygulanan numuneye bakıldığında orta ölçekli tane boyutlarındaki artış göze çarpmıştır. Öyleki 1,4 mm – 1 mm. ve 0,5 mm. üstü eleklerde yaklaşık toplam % 58 numune tespit edilmiştir.

Tablo 6.9: Tamamı 90 sn süresince 5 mm Altına Öğütülmüş Numunenin Elek Analizi Sonuçları

Boyut Aralığı, mm	Miktar, %	∑ Elek Üstü, %	∑ Elek Altı, %
-5,00+3,35	2,98	2,98	100,00
-3,35+2,36	3,21	6,19	97,02
-2,36+1,40	11,24	17,43	93,81
-1,40+1,00	17,89	35,32	82,57
-1,00+0,50	25,92	61,24	64,68
-0,50+0,25	13,30	74,54	38,76
-0,25+0,10	9,63	84,17	25,46
-0,10+0,045	5,96	90,13	15,83
-0,045	9,86	100,00	9,87
Toplam	100,00		

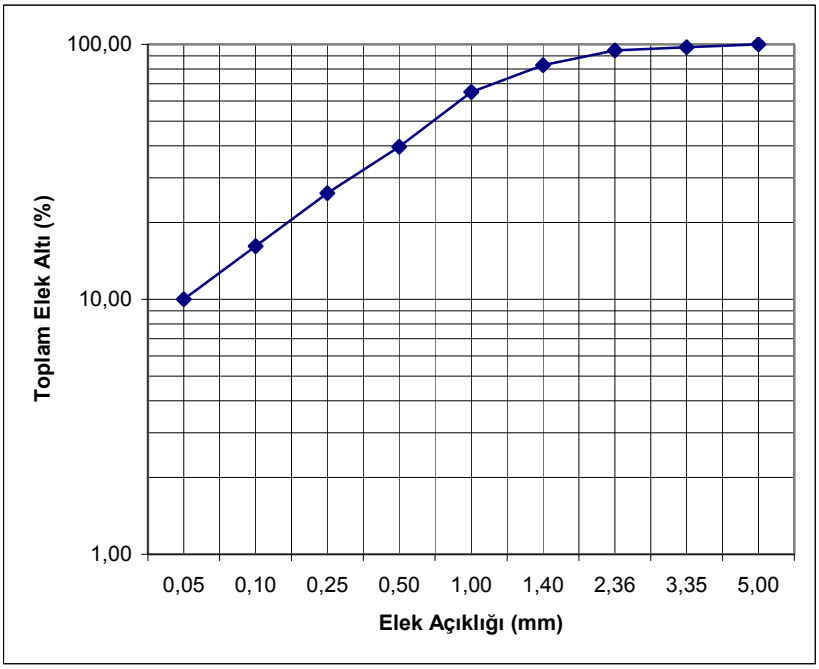


Şekil 6.6. 90 sn. süresince öğütme işlemi uygulanan baskı devresinin elek analizi sonucundaki tane boyutu dağılımı

90 sn. öğütme işlemi uygulanan numunede 3,35mm ve 2,36 mm. üstü numunelerin artık etkisini kaybetmeye başladığı görülmüştür. Bununla birlikte orta ölçekli tane boyutundaki numunelerdeki artışın sürdüğü ve mikron seviyesindeki tane boyutlarında da artış olduğu görülmüştür.

Tablo 6.10: Tamamı 120 sn süresince 5 mm Altına Öğütülmüş Numunenin Elek Analizi Sonuçları

Boyut Aralığı, mm	Miktar, %	∑ Elek Üstü, %	∑ Elek Altı, %
-5,00+3,35	2,52	2,52	100,00
-3,35+2,36	2,89	5,41	97,48
-2,36+1,40	11,75	17,16	94,59
-1,40+1,00	17,80	34,96	82,84
-1,00+0,50	25,40	60,36	65,04
-0,50+0,25	13,54	73,90	39,64
-0,25+0,10	9,96	83,86	26,1
-0,10+0,045	6,14	90,00	16,14
-0,045	10,00	100,00	10,00
Toplam	100,00		



Şekil 6.7. 120 sn. süresince öğütme işlemi uygulanan baskı devresinin elek analizi sonucundaki tane boyutu dağılımı

Elek analizi sonucunda elde edilen grafikler irdelendiğinde şu sonuçlar elde edilmiştir:

- 0,1 – 0,045 mm. arasındaki malzemelerin plastik olduğuna, bu bölgede hiç bir metale rastlanmamasından dolayı karar verilmiştir.
- 1,4 – 0,5 mm. arası bütün elek analizlerinde yakın miktarlarda bulunmuştur. Bu nedenle bu bölgenin metal zonu olduğuna karar verilmiştir.
- 3,35mm. ve 2,36mm. üzerindeki numunelerin miktarının öğütme zamanının artmasıyla azaldığı ve azalan miktarın daha çok mikron seviyesindeki kısma ve azda olsa orta ölçekli kısmı arttırdığı gözlenmiştir. Bunun nedeninin büyük tane boyutunda plastiklerin içinde bulunan metallerin yüksek öğütme zamanında plastiklerden sıyrılmasına bağlı olduğu düşünülmektedir.

6.1.7. Yoğunluk Farkına Göre Ayırım Sonuçları

Baskı devrelerindeki metal ve plastik kısmı birbirinden ayırmak için uygulanan ağır ortam seperason yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem için hazırlanması gereken süspansiyonun yoğunluk hesaplaması yapılmış ve süspansiyon ona göre hazırlanmıştır. Deneylerde kullanılan ferro silikonun yoğunluğu analiz sonuçlarına göre 3,2 g/ml olarak bulunmuştur. Öncelikle ferro silikonun başlangıç deneylerinde kullanılacak hacmi hesaplanmıştır.

$d = m/V$ d_1= Suyun yoğunluğu = 1 g/ml

d_2= Ferro silikonun yoğunluğu = 3,2 g/ml

Deneylerde başlangıç hacmi olarak 5000 ml. olarak belirlenmiştir. Ferro silikonun yoğunluğuna x dersek;

$d_k = 1,5 = [(1*(5000-x)] + 3,2*x) / (5000)$

$7500 = 5000 + 2,2\ x$

$2,2\ x = 2500$

x = 1136,36 ml (Ferro silikonun toplam 5000 ml süspansiyon icersinde kapladiği hacim)

5000 – x = 3863,64 ml (Suyun 5000 ml süspansiyon içersinde kapladığı hacim)

$d_{ferro\ silikon} = m/V$

3,2 = m/ 1136,36

m= 3636,36 g Ferro silikon başlangıç deneyinde kullanılmıştır.

Yukardaki hesaplamalarda bulunan değerlerde ferrosilikon ve su karıştırıcı vasıtasıyla 1 saat boyunca karıştırılmış ve ferro silikon taneleri havada asılı vaziyette kalmış yani süspansiyon hazır hale gelmiştir. Bu süspansiyon içersine daha önce demontajı, kırma işlemi ve 2 dak. öğütme işlemi yapılmış 1000 g baskı devresi hurdası karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi 30 dak. devam etmiş ve süspansiyon üzerinde yüzen kısım beher vasıtasıyla alınmıştır. Beherle alınan bu kısım daha sonra etüvde kurutulmuştur. Mevcut numune süspansiyondan gelen az miktarda ferro silikon ve baskı devresinden gelen plastik kısımdır. Süspansiyondan gelen ferro silikonu alabilmek için 35 µm. delik aralığı olan elek ile elenmiş ve elek üstünde kalan numune plastik kısım olarak belirlenmiştir. Elek üzerinde kalan kısım tartılmış ve 188,14g olarak bulunmuştur. Bu değeri başlangıçta deneye giren miktarla oranlandığında % 18,81 değeri bulunmuştur. Baskı devresinin içerisinde %30 oranında plastik olduğu bilindiğinen geri kalan kısmın metaller ile birlikte büyük taneler şeklinde süspansiyonun dibinde olduğu görülmüştür.

6.2.İşlemci Deney Sonuçları

İşlemcilere öğütme, manyetik ayırma, elek analizi ve kimyasal analiz gibi bazı işlemler uygulanmış ve bu işlemlerin sonuçları aşağıda verilmiştir.

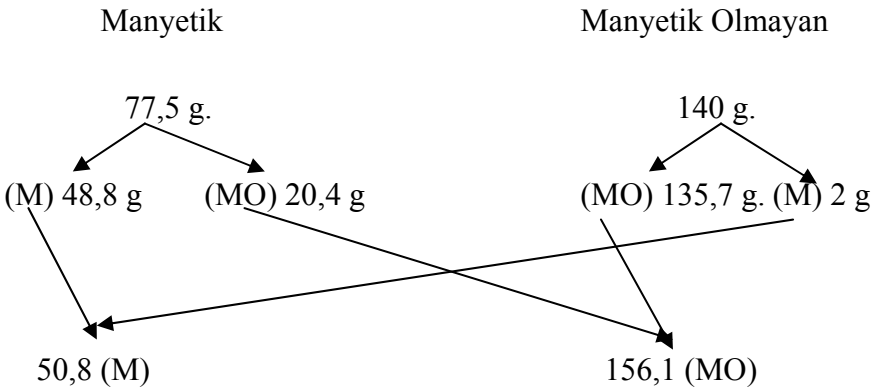
6.2.1. Öğütme İşlemi Deney Sonuçları

Öğütmeden önceki toplam ağırlık : 247,3 g.

Öğütmeden sonraki toplam ağırlık : 245 g.

6.2.2. Manyetik Ayırma İşlemi Deney Sonuçları

Manyetik ayırma işlemi sonrası işlemcilerin manyetik ve manyetik olmayan kısımlarının miktarları tespit edilmiştir.



Manyetik Kısım	50,8 g
Manyetik Olmayan Kısım	156,1 g

6.2.3. Elek Analizi Sonuçları

Elek analizi sonrasında kalan numunelerin ağırlıkları

Manyetik Olmayan Kısım	156,1 g
Manyetik Kısım	50,8 g
Manyetik Levha	38,1 g

Manyetik ayırma işlemi sonrasında bulunan değerler ile elek analizi sonrasında bulunan değerler arasında farklılık tespit edilmiştir. Bunun nedeninin manyetik olmayan toz parçacıkların manyetik kısma yapışması ve ağırlık olarak yanıltmaya neden olduğu tespit edilmiştir. Manyetik ayırma işlemi ve elek analizi işlemlerinin sonunda oluşan numune analize gönderilmeden önce şekil ayrımına tabi tutulmuştur. Gözle yapılan bu ayrımda manyetik olmayan toz, manyetik toz, manyetik levha olmak üzere 3 kısım meydana gelmiştir.

Bu üç kısım kimyasal analize gönderilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

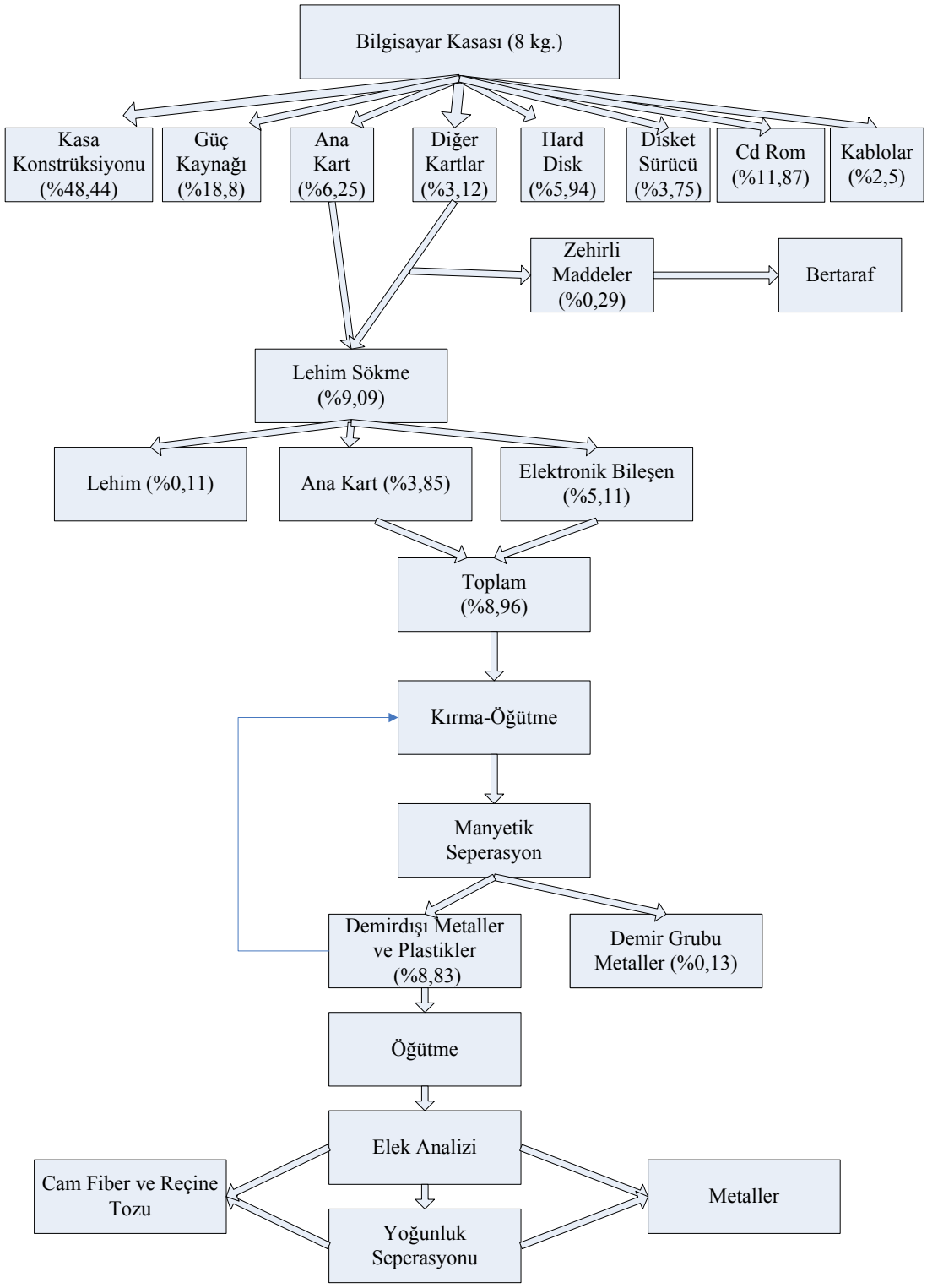
Manyetik Olmayan Toz	**% 0,45 Au**
Manyetik Toz	**% 1,97 Au**, **% 46,32 Fe, % 34,06 Ni, % 13,14 Cu**,
Manyetik Levha	**% 2,75 Au**

7. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, elektrik ve elektronik hurda ekipmanlarının geri dönüşümüne yönelik uygun tane boyutlu malzemeleri bulmak amacıyla en verimli ön işlemler ve proses optimizasyonları araştırılmıştır. Geri dönüşüme uygun hammadde hazırlamak için demontaj, lehim sökme, kırma, öğütme, manyetik ayırma, elek analizi, yoğunluk farkına göre ayırma işlemleri uygulanmıştır. Hammadde olarak bilgisayar baskı devreleri ve işlemcileri kullanılmıştır. Baskı devreleri öncelikle manuel demontaj işlemine tabi tutulmuş, bu işlemle baskı devrelerine bağlı olan piller ve bazı zehirli madde içeren malzemeler sistemden uzaklaştırılmıştır.

Şekil 6.4.'de bir bilgisayar kasasının ilk işlem kademesinden itibaren geçirdiği işlem ve adımlar ve her bir adımdaki ağırlık %'leri verilmiştir. Başlangıç olarak 8 kg. olan bilgisayar kasası demonte edilmiş ve 3,875 kg. kasa konstrüksiyonu, 1,450 kg güç kaynağı, 500 g ana kart, 250 g diğer kartlar, 475 g hard disk, 300 g disket sürücü, 950 g cd-rom sürücüsü ve 200 kablolardan oluştuğu tespit edilmiştir.

Deneysel çalışmalarda kullanılacak ekipmanlar ana kart ve diğer kartlar olarak belirlenmiştir. Bu kartların %0,29'u demontaj esnasında bertaraf edilmiştir. Toplam kasanın % 9,09' unu oluşturan bu kartlar üzerlerinde bulunan lehimlerden kurtulunabilmek için fırına sokulmuştur. Bilgisayar kasasının %0,11'i lehim, %3,85'i anakart ve %5,11'i anakartlara lehimlerle tutturulmuş elektronik bileşenlerden oluştuğu tespit edilmiştir. Burdan anakartlar ve elektronik bileşenler kırma ve öğütme işlemine gönderilmiş ve daha sonar manyetik ayırma işlemi uygulanmıştır. Manyetik ayırma işlemi sonrasında ana kartlarda bulunan demirdışı metal ve plastik miktarı bilgisayar kasasının %8,83' ünü, demir grubu metaller ise 0,13' ünü oluşturduğu görülmüştür.



Şekil 7.1: Bir Bilgisayar Kasasının Ağırlık Dağılımı

- Başlangıç olarak 3024,5 g olarak alınan baskı devreleri demontaj işlemi sonrasında 2967,3 g'a düşmüştür. Böylece toplam 57,2 g malzeme ayrılmıştır. Bu malzemeler, piller, vidalar, soketler vb.dir.

- Demontaj işleminden sonra baskı devrelerindeki lehimden kurtulmak amacı ile baskı devreleri farklı sıcaklık ve sürelerde fırında tutulmuştur. 200-220 ^{o}C arasında baskı devresindeki lehim 30 dakika sonunda tamamen ergimiş ve sistemden alınmıştır. Lehim alma işlemi için optimumsıcaklık aralığı 200-220 ^{o}C olarak belirlenmiştir.

- Fırından alınan lehim miktarı toplam baskı devresinin ağırlıkça % 1,17'sini oluşturmaktadır.

- Elek analizi sonuçlarına göre 2 dak.'lık öğütme işlemi sonrasında metal ve plastik fazlar kısmen ayrılmıştır.

- 1.5g/ml yoğunluğa sahip ortamda gerçekleştirilen yoğunluk farkına göre ayırma işlemi sonrasında başlangıç ağırlığının %18,81'i yüzdürülerek sistemden alınmıştır.

- Öğütülen işlemcilere manyetik ayırma ve elek analizi işlemleri uygulanmış ve sonuçta 176,4 g manyetik olmayan toz kısım, 29,8 g manyetik toz kısımve 38,8 g manyetik levha tespit edilmiştir.

- Manyetik ayırma ve elek analizlerine tabi tutulan işlemciler kimyasal analize gönderilmiştir. Manyetik olmayan toz içerisinde % 0,45 Altın, manyetik toz içerisinde % 1,97 Altın, % 46,32 Demir, % 34,06 Nikel, % 13,14 Bakır ve manyetik levha içerisinde % 2,75 Altın bulunmuştur.

- Kimyasal analiz sonucunda işlemciler içersinde toplam % 0,996 Altın olduğu tespit edilmiştir. Bu oran 100 kg. işlemcide 996 g. altına karşılık gelmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Veit, H.M. and Diehl, T.R.**, 2004. Utilization of magnetic and electrostatic seperation in the recycling of printed circuit boards scrap, *Waste Management*, 25, 67-73.

[2] **Özyurt, E.**, 1999. Elektronik Hurda Kapsamında Baskı Devrelerinin Geri Kazanımı, *Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Kimya Metalurji Fakültesi, İstanbul.

[3] **http://flash.lakeheadu.ca/~mruel**]

[4] **Hoffmann, J.E.**, 1992. Recovering Precious Metals from Electronic Scrap, 43-48.

[5] **Menad, N., Björkman, Bo. and Allain, E.G.**, 1998. Combustion of plastics contained in electric and electric scrap, Resources, *Conservation and Recycling*, 24, 65-85.

[6] **Cui, J. and Forssberg, E.**, 2003.Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review, *Journal of Hazardous Materials*, B99, 243-263.

[7] **Zhang, S. and Forssberg, E.**, 1999. Intelligent Liberation and classification of electronic scrap, *Powder Technology*, 105, 295-301.

[8] **Gürmen, S.**, 1998. Elektronik Hurdaların Hazırlanmasında Yeni Bir *Proses, Metal Dünyası*, 65, 70-73.

[9] **Emre, M., Gürmen, S., Timur, S. and Duman, İ**., 1999. Baskı Devrelerinin Geri Kazanımı, 46-49.

[10] **Zhang, S. and Forssberg, E.** 1997. Mechanical seperation-oriented characterization of electronic scrap, *Resour. Conserv. Recycle*, 21, 247-269.

[11] **Kaytaz, Y.**, 1990. Cevher Hazırlama, *İ.T.Ü. Gümüşsuyu Matbaası*, İstanbul

[12] **Kang, H.Y. and Schoenung J.M., 2004.** Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options, *Resources Conservation & Recycling*, 45, 368-400.

[13] **Yokoyama, S. and Iji, M.**, 1998. Recycling System for Printed Wiring Boards with Mounted Parts, *Special Issue on Environmental Technology*, 39, 111-115.

[14] **Williams, J.A.S., 2005.**, A review of electronics demanufacturing processes,

Resources Conservation & Recycling, 1-13.

[15] **Lesko, M and Bugel M.**, Viscosity of the ferrosilicon suspension as a function of the solid phase parameters,1997, *Acta Montanistica Slovaca*, 319-322.

[16] **Gooseney M., and Kelher R.i** A Scoping Study End-Of-Life Printed Circuit Boards, 2002, *Department of Trade and Industry*, 0-44.

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında İstanbul'da doğan Murat ESKİCİ, ilk ve orta öğrenimini tamamladıktan sonra 1998 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünü kazanmıştır. 2003 senesinde lisans eğitimini tamamladıktan sonra treyler imalatı üzerine çalışmakta olan Meral Kasa San ve Tic. Ltd. Şti'de işe başlamıştır. Aynı sene içerisinde İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde yüksek lisans yapmaya başlamıştır.