

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ATIK LASTİK YÖNETİMİ VE ATIK LASTİK PİROLİZİ MODEL
TESİSİ İÇİN YAPILABİLİRLİK ÇALIŞMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Onursal YAKABOYLU**

Anabilim Dalı : Kimya Mühendisliği

Programı : Kimya Mühendisliği

OCAK 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ATIK LASTİK YÖNETİMİ VE ATIK LASTİK PİROLİZİ MODEL
TESİSİ İÇİN YAPILABİLİRLİK ÇALIŞMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Onursal YAKABOYLU
506081014**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24.12.2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 28.01.2010

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Filiz KARAOSMANOĞLU
(İTÜ)**

**Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Serdar YAMAN (İTÜ)
Prof. Dr. Gündüz ATEŞOK (İTÜ)**

OCAK 2010

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim boyunca, benden bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen, bilimsel çalışma disiplini ve mutluluğunu öğrendiğim, manevi desteğini her an hissettiğim ve en önemlisi, hayata farklı bir bakış açısı kazanmamı sağlayan, bana sadece akademik açıdan değil, her konuda destek veren çok değerli hocam Prof. Dr. Filiz KARAOSMANOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında yararlanmış olduğum simülasyon programını kullanmamı sağlamaları ve tezime ilişkin yardımlarından dolayı Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş. Genel Müdürü Sayın Yavuz ERKUT, Genel Müdür Yardımcısı Sayın Gürol ACAR, Teknik Servisler Müdürü Sayın Delalettin NASUHBEOĞLU, Sayın Aylin KURT ve Sayın Yeşim KÖPRÜLÜ'ye teşekkürü borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca, tezim başta olmak üzere bana her konuda sonsuz desteğini veren Kim. Yük. Müh. Aslı İŞLER'e ve tezim süresince yanımda bulunan tüm dostlarıma çok teşekkür ederim.

Son olarak, beni bugünlere getiren, sınırsız özverileri ile her türlü olanağı sağlayan ve bana daima destek olan biricik anneme, canım babama, benim için çok değerli olan ve hayatımda her zaman benim için herşeyi yapmaya hazır canımdan çok sevdiğim ağabeyim Enderalp YAKABOYLU'ya ve dedeme en derin duygularıyla teşekkür ederim.

İstanbul, Aralık 2009

Onursal Yakaboylu

Kimya Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY.....	xv
1. GİRİŞ ve AMAÇ.....	1
2. TEORİK ÇALIŞMA.....	3
2.1 Lastik	3
2.1.1 Lastiğin yapısı	6
2.1.1.1 Doğal kauçuk	7
2.1.1.2 Yapay kauçuk	8
2.1.1.3 Karbon siyahı	9
2.1.1.4 Diğer dolgu maddeler	10
2.1.2 Lastik üretimi	10
2.2 Türkiye ve Dünya Lastik Endüstrisi.....	14
2.3 Atık Lastik	15
2.3.1 Türkiye ve dünya için atık lastik verileri	16
2.3.2 Atık lastik ve çevre	16
2.4 Atık Lastik Yönetimi	18
2.4.1 Geri dönüşüm	19
2.4.2 Atık lastiklerin yeniden kullanılması.....	22
2.4.3 Atık lastiklerin depolanması	22
2.4.4 Enerji geri kazanımı	23
2.4.5 Malzeme geri kazanımı.....	24
2.4.5.1 Tanecik boyutu küçültme	26
2.4.5.2 Elektrik ark fırınlarındakullanma	27
2.4.5.3 Devulkanizasyon	27
2.4.5.4 Isıl bozundurma işlemleri	28
2.4.6 Türkiye, AB ve ABD için atık lastik yasal mevzuatı	32
2.5 Atık Lastik Pirolizi	34
2.6 Kaynak Tarama Çalışması	43
3. YAPILABİLİRLİK ÇALIŞMASI.....	51
3.1 Atık Lastik Pirolizi Model Tesis Tasarımı	51
3.1.1 Tesis blok şeması.....	53
3.1.2 Tesis proses akım şeması	55
3.2 Atık Lastik Pirolizi Model Tesis İçin Maliyet Analizi	58
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	63
4.1 Atık Lastik Pirolizi Model Tesis Tasarımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi ...	63
4.2 Doğrudan Maliyet Analizi ve CAPCOST® Programı ile Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	63

4.3 Şimdiki Değer Maliyet Analizi ve CAPCOST® Programı ile Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	67
4.4 Karlılığın Değişen Ürün Fiyatlarına Göre Değerlendirilmesi.....	69
5. VARGILAR VE ÖNERİLER	73
5.1 Atık Lastik Pirolizi Model Tesisi İçin Vargılar	73
5.2 Atık Lastik Pirolizi Model Tesisi İçin Öneriler	75
5.3 Türkiye Atık Lastik Yönetimi İçin Öneriler	77
KAYNAKLAR.....	79
EKLER	85

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
Ağır.	: Ağırlıkça
BET	: Brunauer-Emmett-Teller
BIIR	: Klorobütıl bromobütıl kauçuğu
BR	: Cis polibütadien kauçuğu
C₁	: 1. durum için kapasite
C₂	: 2. durum için kapasite
C_{BM}	: Ekipmanlar için doğrudan veya dolaylı maliyet
C⁰_{BM}	: Temel koşullarda çalışam ekipmanlar için doğrudan veya dolaylı maliyet
C_{GR}	: Temel maliyetler toplamı
C_{OL}	: İşçilik giderleri
C_{RM}	: Hammadde maliyeti
C_{TI}	: Toplam yatırım miktarı
C_{TM}	: Toplam modül maliyeti
C_{UT}	: Servis akımları maliyeti
C_w	: İş sermayesi
C_{WT}	: Atık bertaraf maliyeti
cm³	: Santimetre küp
CBR	: Cis polibütadien kauçuğu
CCP	: Proje sonunda elde edilen toplam kazanç
COM_D	: İşletme maliyeti
d_k^{SL}	: Amortisman giderleri
dak	: Dakika
DTG	: Diferansiyel termogravimetrik analiz
EPDM	: Etilen-propilen-dien kauçuğu
F₁	: 1. durum için fiyat
F₂	: 2. durum için fiyat
FCI_L	: Toplam sabit yatırım maliyeti
g	: Gram
h	: Saat
Hac.	: Hacimce
IIR	: İzobütilen-izopren (bütıl) kauçuğu
i	: Kapasite katsayısı
KÇ	: Karbon Çelik
Kg	: Kilogram
KKO	: Kapasite kullanım oranları
kmol	: Kilo mol
kPa	: Kilo Pascal
kW	: Kilo-Watt
kWh	: Kilo-Watt Saat
L	: Litre
LASDER	: Lastik Sanayicileri Derneği

m	: Metre
m²	: Metrekare
m³	: Metreküp
MJ	: Mega Joule
ml	: Mililitre
MPa	: Mega Pascal
MW	: Mega-Watt
n	: Amortisman süresi
OSD	: Otomotiv Sanayii Derneği
PAH	: Polisiklik aromatik hidrokarbonlar
PBP	: Projenin toplam yatırım maliyetini karşılaması için geçen kendini geri ödeme süresi
PETKİM	: Petrokimya Holding Anonim Şirketi
PLC	: Programmable logic controller
R	: Satış hasılatı
R_y	: Yıllık net hasıla
s	: Saniye
S	: Proje sonlandırıldıktan sonra ekipmanların hurda değeri
SS	: Paslanmaz Çelik
SBR	: Stiren bütadien kauçuğu
ST-52	: En az 52 kgf/mm ² veya 520 n/mm ² çekme dayanımına sahip olan çelik
t	: Gelir vergisi oranı
TGA	: Termogravimetrik analiz
TL	: Türk Lirası
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TÜPRAŞ	: Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş.
°C	: Santigrat derece
W	: Watt
µm	: Mikrometre
\$	: ABD Doları
€	: Avro

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Binek ve kamyon lastiklerinin bileşimi ve ağırlıkları.....	7
Çizelge 2.2 : Türkiye için yıllara göre lastik üretim ve KKO.....	15
Çizelge 2.3 : Türkiye’de faaliyet gösteren lastik üreticilerinin 2005 yılı üretimi.....	15
Çizelge 2.4: Çeşitli ülkeler ve Türkiye için ihraç edilen ve yeniden kaplanan miktarlar hariç atık lastik miktarları ve değerlendirilme yöntemleri.....	21
Çizelge 2.5 : Kuru bazda lastik kısa analizi, (Ağır. %’si)	24
Çizelge 2.6 : Kuru bazda lastik elemental analizi, (Ağır. %’si).....	24
Çizelge 2.7 : Lastik ve çeşitli yakıtların ısı değeri ve emisyon miktarları karşılaştırması.....	24
Çizelge 2.8 : NR, BR ve SBR’nin bozunmasıyla oluşan ana bileşikler.	36
Çizelge 2.9 : Çeşitli sıcaklıklarda elde edilmiş piroliz yağı, Fuel Oil No:3 ve No:4 özelliklerinin karşılaştırılması.	41
Çizelge 2.10 : Piroliz sonucu elde edilen karbon siyahı ve çeşitli ticari karbon siyahları özelliklerinin karşılaştırılması.	42
Çizelge 2.11 : Piroliz gazı bileşimi ve üst ısı değeri.	43
Çizelge 3.1 : Hesaplamalar için belirlenen piroliz yağı bileşimi	53
Çizelge 3.2 : Piroliz reaktörü çalışma koşulları ve malzeme bilgileri.....	56
Çizelge 3.3 : Proses ekipmanları fiyatları.....	59
Çizelge 3.4 : Birim başına proses girdi ve çıktı fiyatları.	60
Çizelge 4.1 : Doğrudan analiz yöntemine göre tesis maliyet bilgileri.	65
Çizelge 4.2 : Şimdiki değer yöntemine göre yıllara göre değişen net hasıla.....	68
Çizelge 4.3 : Karlılık durumunun incelendiği çeşitli durumlar.	70

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Lastiğin bileşenlerinin şematik olarak gösterimi.....	4
Şekil 2.2 : İzopren monomeri ve poliizopren yapısı.	8
Şekil 2.3 : Stiren-bütadien kauçuğunun açık formülü.	8
Şekil 2.4 : Cis polibütadien kauçuğunun açık formülü	9
Şekil 2.5 : Lastik üretimi akış şeması.	11
Şekil 2.6 : Poliizoprenin kükürt ile yapılan vulkanizasyon reaksiyonu.	14
Şekil 2.7 : 1999 yılında ABD'nin Kaliforniya eyaletinde çıkan lastik yangını	18
Şekil 2.8 : Atık lastik yönetimi.	20
Şekil 2.9 : ABD 2005 yılı atık lastik değerlendirme yöntemleri	21
Şekil 2.10 : Atık lastikler için önerilen depolama şekilleri.....	23
Şekil 2.11 : ABD'de üretilen atık lastiklerin enerji olarak geri kazanımı	25
Şekil 2.12 : Normal asfalt ve kauçukla modifiye edilmiş asfaltın karşılaştırılması .	27
Şekil 2.13 : Piroliz ve ürünleri.	30
Şekil 2.14 : Atık lastiğin çeşitli ısıtma hızları altındaki TGA analizleri	35
Şekil 2.15 : Atık lastiğin çeşitli ısıtma hızları altındaki DTG analizleri.	35
Şekil 2.16 : Lastik bileşimini oluşturan NR, SBR ve BR için 10 °C/dak ısıtma hızında DTG eğrisi, x: dönüşüm oranı	36
Şekil 2.17 : Piroliz sırasında doğal kauçuktan limonen oluşumu.	37
Şekil 2.18 : Atık lastik pirolizi için önerilen 1. reaksiyon mekanizması.....	38
Şekil 2.19 : Atık lastik pirolizi için önerilen 2. reaksiyon mekanizması.....	38
Şekil 2.20 : Atık lastik pirolizi için önerilen 3. reaksiyon mekanizması.....	39
Şekil 2.21 : Atık lastik pirolizi için önerilen 4. reaksiyon mekanizması.....	39
Şekil 2.22 : 475 °C'de elde edilen piroliz yağı için kaynama eğrisi	42
Şekil 3.1 : Atık lastik pirolizi model tesisi blok şeması.	54
Şekil 3.2 : Atık lastik pirolizi model tesisi için proses akım şeması	57
Şekil 4.1 : Yıllık sabit gider miktarları ve oranları.	66
Şekil 4.2 : Yıllık gelirin ürünlere göre dağılımı.....	66
Şekil 4.3 : Doğrudan analiz yöntemine göre yıllar içinde projeden elde edilen toplam kazanç	67
Şekil 4.4 : Şimdiki değer yöntemine göre yıllar içinde projeden elde edilen toplam kazanç.	69
Şekil 4.5 : Çeşitli durumlar için karlılık değerlendirilmesi	71

ATIK LASTİK YÖNETİMİ VE ATIK LASTİK PİROLİZİ MODEL TESİSİ İÇİN YAPILABİLİRLİK ÇALIŞMASI

ÖZET

Artan nüfus ve üretim miktarları ile beraber, insanoğlunun ürettiği atık miktarı da sürekli artmaktadır. Otomotiv sanayisindeki üretim artışı lastik üretimini arttırmakta, artan lastik üretimi ile beraber atık lastik miktarı da her yıl artmaktadır. Dünyada her yıl 10 milyon tondan daha fazla atık lastik oluşmakta ve bu miktar giderek artmaktadır. Bu rakam, Türkiye için 200 bin tondur. Atık lastiklerin doğada bozunması oldukça zordur ve bu lastiklerin çevreye verilmesi hem insan sağlığı hem de çevre için ciddi tehlikeler doğurmaktadır. Yanısıra, Türkiye, AB ve ABD’de atık lastiklere ilişkin yasal mevzuat atık lastiklerin doğrudan çevreye verilmesini yasaklamakta ya da kısıtlamaktadır. Dolayısıyla, atık lastikler için atık yönetiminin yapılması hem gerekli hem de zorunludur. Günümüzde atık yönetimindeki hiyerarşi atık oluşumunu önleme, atığı en aza indirme, yeniden-geri kullanım, geri dönüşüm, enerji eldesi-kazanımı ve bertaraf şeklindedir. Atık lastikler için atık yönetimi ise ekonomik maliyetlere ve endüstriyel kullanıma bağlı olarak değişmekte olup geri dönüşüm, yeniden kullanım, depolama, enerji ve malzeme geri kazanımı şeklindedir. Bu yöntemlerden malzeme geri kazanımı ve malzeme geri kazanımı içerisinde de piroliz en uygun yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Piroliz ile atık lastiklerden ekonomik değeri yüksek karbon siyahı, hurda çelik ve piroliz yağı elde edilmekte, ortaya çıkan gaz ürün de proseste kullanılabilir. Bu çalışmada, atık lastik yönetimi, önde gelen atık lastik yönetim süreci olarak piroliz incelenerek, Türkiye’de faaliyet gösterecek yıllık 20 bin ton atık lastik pirolizi gerçekleştirebilecek bir model tesis için yapılabilirlik çalışması gerçekleştirilerek model tesis için teknik detaylar belirlenmiştir. Model piroliz tesisi ile, ürün olarak 9000 ton piroliz yağı, 7200 ton karbon siyahı, 2200 ton hurda çelik ve 1600 ton piroliz gazı elde edileceği belirlenmiş ve elde edilen tüm ürünlerin satıldığı koşulda sonuçlar:

- Toplam yatırım maliyeti : 8,877 milyon TL
- Yıllık işletme giderleri : 4,9 milyon TL
- Yıllık piroliz yağı geliri : 5,85 milyon TL
- Yıllık karbon siyahı geliri : 7,2 milyon TL
- Yıllık hurda çelik geliri : 703,5 bin TL
- Yıllık ciro : 13,753 milyon TL
- Yıllık net hasıla : 5,878 milyon TL
- Tesis geri ödeme süresi : 1,3 yıl şeklinde bulunmuştur.

Bu sonuçlara göre, kurulabilecek atık lastik pirolizi model tesisinin oldukça karlı olduğu ve yatırım miktarını kısa sürede karşıladığı görülmektedir. Ayrıca, elde edilen sonuçlar ve değişen çeşitli durumlar eşliğinde karlılık analizi ve karlılığın değişimi sonuçları da sunulmaktadır.

WASTE TIRE MANAGEMENT AND FEASIBILITY STUDY FOR A MODEL WASTE TIRE PYROLYSIS PLANT

SUMMARY

With the increase in the human population and production rates, the waste production rate is increasing rapidly. The increase in the automotive industry increases the tire production rates, and with the increase in the tire production, waste tire production is increasing. Every year more than 10 millions tons of waste tires are produced in the world and this amount is increasing rapidly. This number is 200 thousands tons for Turkey. The natural decomposition of the waste tires in the environment takes a very long time and giving these waste tires directly to the environment is a big threat for human health and the environment. Besides, regal regulations for waste tires in Turkey, EU and USA prohibit or limit the landfilling of these waste tires. Consequently, waste management for these waste tires not only is neccessary but also required. At present time, waste hierarchy for the wastes is to prevent, reduce, reuse, recycle, energy recovery and disposal respectively. Waste tire management varies with the cost of the method and industrial usage of the products. Waste management for waste tires consists of recycle, reuse, storage, energy and material recovery methods. From these methods, material recovery and from material recovery, pyrolysis can be considered as the appropriate method. With pyrolysis, valuable products such as carbon black, scrap steel and pyrolysis oil can be obtained from waste tires. Also, the pyrolysis gas that has been obtained can be used in the process. In this study, waste tire management, as a foremost waste tire management process pyrolysis has been examined and a feasibility study has been made for a model plant that can operate with a capacity of 20 thousands tons of waste tires per year and technical details of the model plant has been determined. With the model plant, a yield of 9000 tons of pyrolysis oil, 7200 tons of carbon black, 2200 tons of scrap steel and 1600 tons of pyrolysis gas has been obtained and the results has been determined as:

- Total fixed capital investment : 8,877 millions of TL
- Yearly cost of manufacturing : 4,9 millions of TL
- Revenue from pyrolysis oil : 5,85 millions of TL
- Revenue from carbon black : 7,2 millions of TL
- Revenue from scrap steel : 703,5 thousands of TL
- Yearly total revenue : 13,753 millions of TL
- Yearly net profit : 5,878 millions of TL.
- Pay back period for the plant : 1,3 years.

The results show that, the waste tire pyrolysis model plant is quite profitable and the pay back period of the plant is very short. Besides, with these results and various

conditions, profitability analysis and the results of the change in the profitability has been determined.

1. GİRİŞ ve AMAÇ

18. yüzyılda kömürün üretim sırasında enerji girdisi olarak kullanılması ile başlayan sanayi devriminin etkisi insanlık için gözardı edilemez boyutlardadır. Bu etkiler, ortaya çıkan yeni üretim sisteminin dışında, mevcut ekonomik ve toplumsal sistemi de değiştirerek, insanı hiç olmadığı kadar üreten, tüketen ve atık oluşturan bir canlı haline getirmiştir. Değişen toplumsal ve ekonomik sistemle beraber insan nüfusunda da hızla bir artış gerçekleşmiş ve bu artış üretim, tüketim ve oluşan atık miktarlarını arttırmıştır.

İnsanoğlunun ürettiği atık, sanayi devriminin ilk dönemlerinde sorun olarak görülmemişse de, 20. yüzyıla beraber, üretilen atıkların çevreye ve insanoğluna verdiği zararların farkına varılması, bu atıkların yönetiminin gerekli olduğunu göstermiş ve her atık için farklı yönetim şekillerini zorunlu kılmıştır.

Otomotiv sektörü ülkemiz ve dünya ekonomisi için çok önemli bir itici güçtür. Türkiye ve dünya için lastik sektörü de otomotiv sektöründen doğrudan etkilenmektedir. Artan nüfus miktarına bağlı olarak, otomotiv üretimi ve doğal olarak lastik üretimi de sürekli bir artış eğilimindedir [1]. Lastiklerin de belirli bir kullanım ömrünün olduğu göz önünde bulundurulursa, her yıl üretilen atık lastik miktarının da sürekli bir artış eğiliminde olduğu bir gerçektir.

Atık lastiklerin doğrudan çevreye verilmesi, özellikle alıcı ortama gerçekleşen kimyasal sızıntılar ve taşıdığı yangın riski ile çevre ve insan sağlığı için ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Bu yüzden atık lastiklerin doğrudan çevreye verilmesi kanunlarca yasaklanmıştır [2,3]. Bu yüzden atık lastik yönetiminin gerçekleştirilmesi hem gerekli hem de zorunludur. Bununla birlikte atığın ulusal bir servet olduğu unutulmamalıdır. Dolayısıyla atığa, sadece bertaraf edilmesi gereken bir şey olarak değil, çeşitli işlemler ile maddi değeri yüksek son ürünlerin kazanılabileceği gerçeği ile yaklaşılmalıdır.

Bu çalışmada, atık lastik yönetimi kapsamlı bir biçimde sunulması ve atık lastik yönetimi içerisinde, elde edilen son ürünlerin maddi değerinin yüksek ve endüstride

çeşitli sektörlerde kullanılabilme potansiyeli sunması açısından Türkiye’de atık lastik piroliz işlemi gerçekleştirerek son ürünler elde edecek model bir tesis için yapılabilirlik çalışmasının gerçekleştirilmesi ve karlılık analizi yapılması hedeflenmiştir.

2. TEORİK ÇALIŞMA

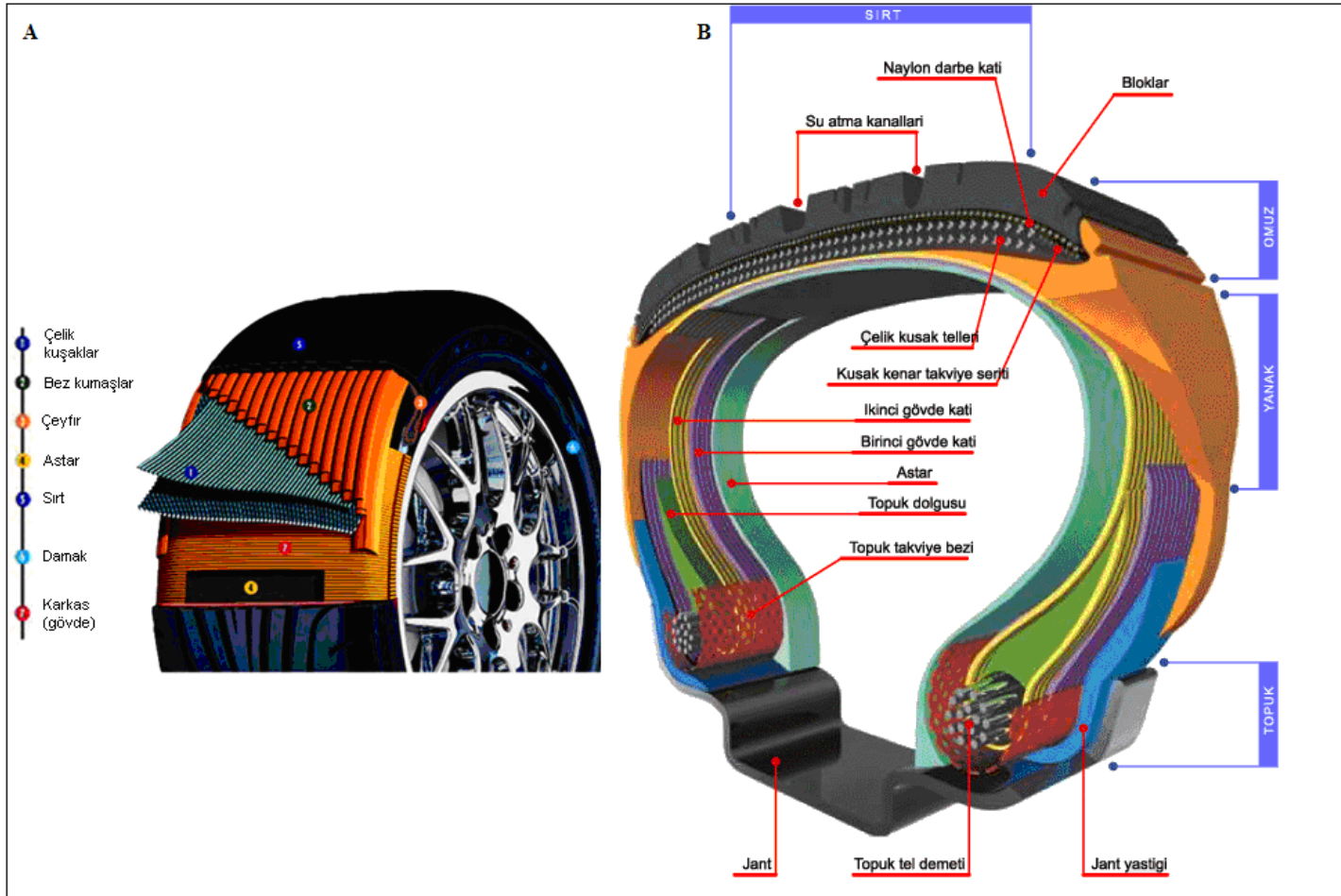
Bu bölümde, aşağıda sıralanan başlıklar altında teorik çalışma sonuçları genel hatlarıyla sunulmaktadır:

- Lastik
- Türkiye ve dünya lastik endüstrisi
- Atık lastik
- Atık lastik yönetimi
- Atık lastik pirolizi
- Kaynak tarama çalışması

2.1 Lastik

Lastik Türk Dil Kurumu tarafından çeşitli şekillerde tanımlanmaktadır. Bu tanımlar, ayakkabı üzerine giyilen kauçuktan pabuç, kauçuktan yapılmış ayakkabı, kauçuktan yazı silgisi ve taşıtların jantlarına yerleştirilen elastiki tekerlek bandajı şeklindedir [4]. Teknik anlamda ise, lastik, belli bir süre içinde, belli bir sıcaklık ve basınç altında pişirilmiş, genellikle içerisinde bulunan hava ile motorlu veya motorsuz nakil araçlarının yere sürtünmesi ile hareketini başlatan, hızlandıran ve durmasını sağlayan, kullanım yerlerine göre çeşitli ebatlarda, tiplerde ve yapılarda olabilen kauçuk hava yastığıdır [5-7].

Lastik sırt, omuz, yanak, topuk (damak) ve karkas (gövde) olarak adlandırılan 5 ana bileşenden meydana gelmektedir. Yanısıra çelik ve bez kuşaklar, ceyfır ve astar da lastiğin yapısında yer alan diğer bileşenlerdir [8,9]. Şekil 2.1’de lastiğin bileşenleri şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.1: Lastiğin bileşenlerinin şematik olarak gösterimi [8].

Bu bileşenler aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

Sırt: Lastiğin yer ile temas ettiği bölge

Omuz: Kalın kauçuktan yapılmış yanak ile sırtın birleştiği bölge

Yanak: Lastiğe esneklik sağlayan, lastiğin topuk ve omuz bölgesi arasında kalan ve üzerinde markaların ve tanıtıcı bilgilerin bulunduğu bölge

Topuk bölgesi: Lastiğin janta temas eden ve sıkıca bağlanmasını sağlayan bölge

Karkas: Polyester kord bezinden üretilen, lastiğin alt ucundaki bir damak telinden diğerine uzayan destek bölümü

Kuşaklar: Çelik ve bezden oluşan lastik sırt deseninin altında uzanan dar katmanlar

Ceyfır: Damak telinin dış kısmında yer alan, karkas yapının jant tarafından aşındırılmasını ve tahrip edilmesini engelleyen, jant ucu üzerinde gerekli olan esnekliği sağlayan bölge

Astar: Hava sızdırmazlığını sağlayarak lastiğin içine sıkıştırılmış basınçlı havanın dışarı kaçmasını önleyen, lastiğin iç yüzeyindeki ince bir kauçuk katmanı [9].

Lastikler yapılarına göre, konvansiyonel ve radyal olmak üzere sınıflandırılır. Bu sınıflandırmadaki esası, lastiğin karkas yapısında kullanılan kord bezinin geometrisi belirler. Konvansiyonel lastiklerde bez iplikler bir topuktan diğerine 30°-40° açılarla uzanır. Radyal lastiklerde ise, çelik veya bez iplikler bir topuktan diğerine lastiğin dönme eksenine göre 90°'lik açı ile uzanır ve katlar birbirleriyle paralel olup çaprazlama kesmezler. Katların üzerinde performansı arttırmak amacıyla zorunlu olarak 15°-20° açılı tekstil veya çelik kuşaklar bulunur [6,9,10].

Araç lastikleri endüstride:

- Binek konvansiyel lastikleri
- Binek radyal lastikleri
- Zirai radyal lastikleri
- Kamyonet/minibüs konvansiyonel lastikleri
- Kamyonet/minibüs radyal lastikleri
- Kamyon-otobüs konvansiyonel lastikleri
- Kamyon-otobüs radyal lastikleri
- Traktör-ön lastikleri

- Traktör-arka lastikleri
- İş makinesi lastikleri
- İç lastik
- Bisiklet motosiklet dış, iç lastiği
- Dolgu lastiği
- Sırt kaplama kauçuğu, tamir malzemeleri ve kaplanmış araç lastiği
- Kolon (ton)

şeklinde tanımlanarak kullanılmaktadır [5].

Lastik, aracın yol ile bağlantısını sağlayan tek bağlantısıdır. Genel olarak lastikler:

- Aracın yükünü taşıma
- Motorun ortaya çıkardığı döndürme momentini yola aktararak çekiş kuvvetine dönüştürme
- Sürüş sırasında oluşabilecek darbeleri emerek konfora katkıda bulunma
- Fren gücünü ve viraj dönüşlerinde direksiyon kontrolü için gerekli olan yanıl kuvveti oluşturma
- Hareketi başlatma ve durdurma için gerekli olan sürtünme kuvvetlerini yola iletme
- Yol kaplamasının türü (asfalt, toprak, şose) ve yolun durumu (yağmur, çamur, kar, buz) değişiklik gösterse bile güvenli şekilde yol tutuşunu sağlama

işlemlerini gerçekleştirir [5-7].

Aşağıdaki bölümde lastiğin yapısı ve üretimi ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

2.1.1 Lastiğin yapısı

Lastiğin yapısında doğal kauçuk, yapay kauçuk, karbon siyahı, çelik, bez kuşak, dolgu maddeleri, hızlandırıcılar ve ozonlaştırmayı engelleyen kimyasallar bulunmaktadır [11]. Çizelge 2.1’de binek ve kamyon lastikleri için ortalama bileşimler verilmiştir.

Lastik yapımında kullanılan hammaddeler ise, doğal kauçuk, yapay kauçuk, kükürt ve kükürtlü bileşikler, silika, fenolik reçine, aromatik, naftanik ve parafinik yağ, çinko oksit, titanyum dioksit gibi dolgu malzemeleri, karbon siyahı, yağ asitleri ve çelik teldir [11]. Lastiklerin yapısında bulunan en önemli hammaddeler doğal kauçuk,

Çizelge 2.1: Binek ve kamyon lastiklerinin bileşimi ve ağırlıkları [6,11,12].

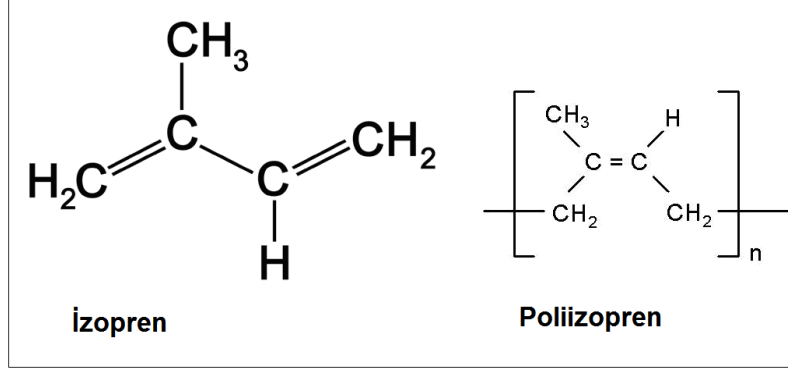
Bileşim (Ağır. %'si)	Binek Lastiği	Kamyon Lastiği
Doğal kauçuk	14	27
Yapay kauçuk	27	14
Karbon siyahı	28	28
Çelik	9,6-15	9,6-15
Bez kuşak, dolgu maddeleri, hızlandırıcılar, ozonlaştırmayı engelleyici maddeler	16-17	16-17
Ortalama Ağırlık (kg)	6,5-10	54

yapay kauçuk, karbon siyahı ve diğer dolgu malzemeleridir. Aşağıdaki bölümlerde lastik hammaddeleri kısaca tanıtılmaktadır.

2.1.1.1 Doğal kauçuk

Doğal kauçuk $(C_5H_8)_n$ genel formülünde bir hidrokarbon olup, Maniloy, Fieus Elastiea, ökse otu, kök sakız, guayola ve deve dikenini gibi bitkilerden de elde edilmektedir. Ekonomik olması sebebiyle üretimi için çoğunlukla Hevea Brasiliensis bitkisi kullanılmaktadır. Doğal kauçuk, sütümsü bir sıvıdan (lateks) üretilmektedir. Bu sıvı % 30-40 kauçuk (cis-1,4 poliizopren), % 2 reçine, % 60-65 su ve % 2-5 lipid ve proteinlerden oluşmaktadır. Lateksten kauçuk eldesi için öncelikle lateks sulandırılır, daha sonra % 1'lik asetik asit veya % 0.5'lik formik asit çözeltileri ilavesi ile pıhtılaştırılır. Yıkama ve kurutma işlemleri ardından kauçuk elde edilir. Fakat elde edilen kauçuğun esneklik ve dayanıklılık özellikleri lastik olarak kullanılabilmesi için yeterli değildir. Kauçuğun lastik olarak kullanılabilmesi için kükürt ile vulkanizasyon işlemine tabi tutulması gerekmektedir [2,6,13,14]. Vulkanizasyon işlemi Bölüm 2.1.2'de "Lastik üretimi" başlığı altında daha ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Vulkanizasyona tabi tutulmuş doğal kauçuk sahip olduğu mekanik özelliklerinden dolayı lastik üretiminde önemli bir yer tutmaktadır. Doğal kauçuk gerilme direnci, yuvarlanma direnci, yapışma ve esneme direnci gibi konularda yapay kauçuklardan daha üstün olmakla beraber, yol kavrama, aşınma ve

ozona karşı dayanım konusunda sentetik kauçuklara göre daha zayıftırlar. Ülkemizde doğal kauçuk üretimi yapılmamaktadır [5,14,15]. Şekil 2.2’de izopren monomeri ve poliizopren yapısı gösterilmiştir.

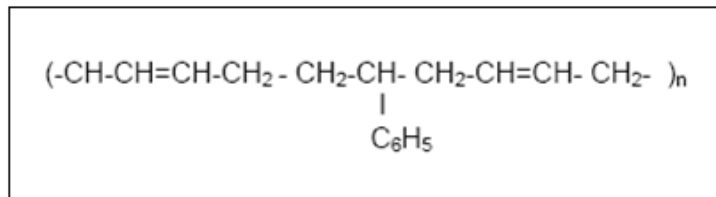


Şekil 2.2: İzopren monomeri ve poliizopren yapısı [16,17].

2.1.1.2 Yapay kauçuk

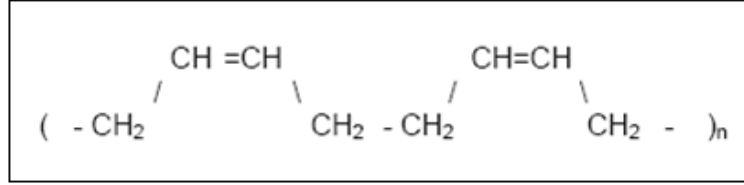
Lastik sanayisinde kullanılan sentetik kauçuklar çoğunlukla stiren bütadien kauçuğu (SBR) ve cis polibütadien kauçuğu (CBR ya da BR) olmakla beraber sentetik lateks, izobütillen-izopren (bütıl) kauçuğu (IIR), klorobütıl bromobütıl kauçuğu (BIIR) ve etilen-propilen-dien kauçuğu (EPDM) da kullanılmaktadır [2,6,15].

Stiren bütadien kauçuğu petrol ürünlerinden elde edilir ve bütün yapay kauçukların üretim ve tüketiminin yaklaşık % 60’ını oluşturur. SBR kauçuğu stiren ve bütadien kopolimeri olup hem emülsiyon hem de çözelti polimerizasyonu ile üretilmesine karşın üretimin % 87’si emülsiyon polimerizasyonu ile gerçekleşmektedir. Çözelti ve emülsiyon polimerizasyonu sonucu oluşan SBR’lerin arasındaki fark, molekül ağırlığı dağılımı ile molekül zincirinin mikro yapısıdır. SBR yüksek sıcaklığa, yağ ve çözücülere karşı çok dirençlidir. Ülkemizde SBR üretimi Petrokimya Holding Anonim Şirketi (PETKİM) tarafından gerçekleştirilmektedir. PETKİM’in üretim kapasitesi 33000 ton/yıl’dır [2,14,15,18]. Şekil 2.3’te SBR’nin açık formülü gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Stiren-bütadien kauçuğunun açık formülü [18]

Cis polibütadien kauçuğu 1,3 bütadien monomerinden çeşitli katalizörler altında çözelti polimerizasyonu yöntemi ile elde edilir. BR'nin içeriği üretimde kullanılan katalizöre göre değişmektedir. Bu katalizörler titanyum, brom, nikel, lityum, sodyum ve kobalt olabilir. Ülkemizde katalizör olarak kobalt kullanılmakla beraber PETKİM tarafından üretilen BR'nin yıllık üretim kapasitesi 20 000 tondur. Lastik sanayisinde en çok kullanılan yapay kauçuk BR'dir [2,15,18]. şekil 2.4'te BR'nin açık formülü gösterilmektedir.



şekil 2.4: Cis polibütadien kauçuğunun açık formülü [18].

2.1.1.3 Karbon siyahı

Karbon siyahı gaz veya sıvı haldeki hidrokarbonların kısmi yanma ve/veya ısıl parçalanma işlemleri sonucunda elde edilen, yapısal olarak grafitte benzeyen, halk dilinde “is karası” olarak da adlandırılan ince karbon taneleridir. Endüstride büyük bir çoğunlukla kısmi yanma işlemi ve fırın yöntemi ile elde edilir. Fırın yöntemi olarak adlandırılmasının nedeni kısmi yanma işlemi için kullanılan reaktörlerin fırın şeklinde olmasıdır. Ülkemizde yıllık 40 bin ton üretim tek üretici olan Türkiye Petrol Rafinerileri A.ř. (TÜPRAş) tarafından gerçekleştirilirken, bir o kadar miktarda ithal edilmektedir. Fakat TÜPRAş, Ocak 2009'dan itibaren karbon siyahı üretimini gerçekleştirmemektedir [5,18,19].

Karbon siyahı, dolgu malzemeleri içerisinde en önemli olan bileşimi olup kauçuğun hem mekanik özelliklerini artırır hem de renk verme işlemini gerçekleştirir. Karbon siyahı vulkanizasyon işlemi sırasında kauçuk ile karıştırıldığı zaman, kauçuk zincirlerinin bir kısmı kırılır ve kırılan uçlarda radikaller oluşur. Oluşan radikaller karbon siyahı ile birleşerek karbon-polimer bağı oluştururlar. Karbon siyahı kauçuğun kendine özgü sertliğini azaltır, vulkanizasyon işlemini hızlandırır, kauçuğun vulkanizasyon öncesi haline dönmesini engeller ve kopma gerçekleşmeden şekil değişikliğinin gerçekleşmesini sağlar [15,18].

Karbon siyahları piyasada farklı çeşitlerde üretilmektedir. Başlıca yüzey alanına ve tanecik boyutuna göre değişen karbon siyahı, yapısına göre genel olarak sert ve

yumuşak türler olarak ikiye ayrılır. Sert tür karbon siyahı lastiğin yolla temas eden sırt kısmında ve topuk bölgesinde kullanılırken, yumuşak tür karbon siyahı yanak ve gövde kısımlarında kullanılır [15,18].

2.1.1.4 Diğer dolgu maddeleri

Lastiğin yapısında çeşitli dolgu maddeleri bulunmaktadır. Bunlardan en önemlileri kalsit, çinko oksit, demir oksit, kükürt ve silis gibi inorganik yapıda olan dolgu malzemeleridir. Bu dolgu maddelerinin lastik üretimindeki kullanım amacı vulkanizasyon işleminin gerçekleşmesini sağlamak ve verimini arttırmaktır [14,18].

Dolgu maddelerinin yanısıra çelik ve tekstil iplikleri de lastiğin iskeletini oluşturma ve mukavemet kazandırma amacıyla lastiğin yapısında bulunmaktadır [18,20].

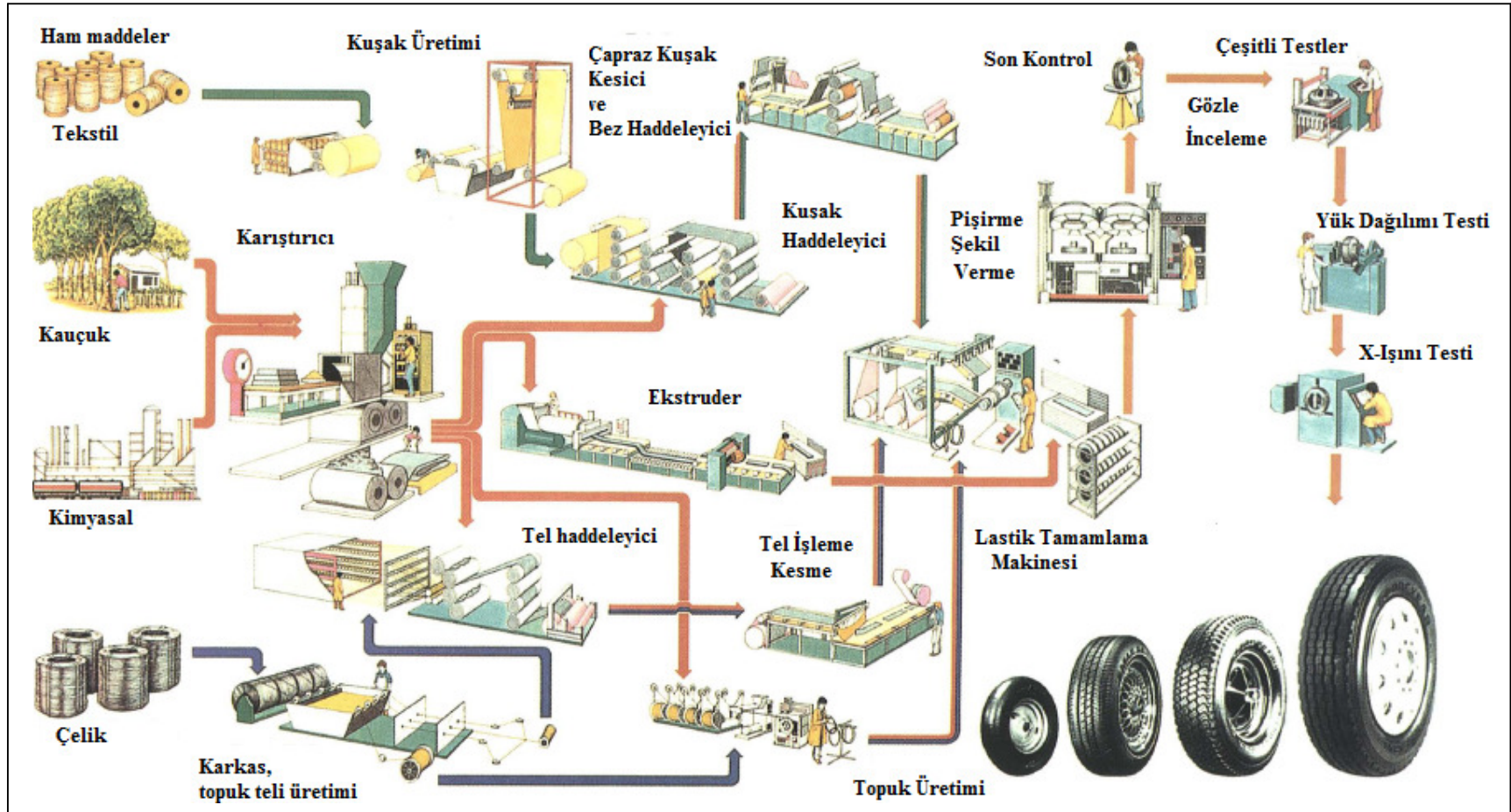
2.1.2 Lastik üretimi

Lastik üretimindeki aşamalar:

- Elastomerlerin, karbon siyahının ve kimyasalların lastik bileşimini oluşturmak için karıştırılması
- Tekstil ve çelik kuşakların işlenmesi ve haddeleme operasyonu sırasında elde edilen lastik bileşimiyle kaplanması
- Ekstruderlerde yanak, sırt ve diğer bileşenlerin çekilmesi
- Lastik elemanlarının montajı
- Yüksek sıcaklık ve basınçta lastiğe şekil verilmesi ve pişirilmesi
- Lastiğin son kontrollerinin yapıp nakliye edilmesi şeklindedir [20].

Şekil 2.5'te bu aşamalar şematik olarak verilmiştir.

Karıştırma işleminin amacı sırt, yanak, gövde ve iç lastiği oluşturan hammaddelerin homojen bir biçimde dağılmasını sağlamak, karışımın istenilen yumuşaklıkta olmasını sağlamak ve dağılım ile viskozite dereceleri aynı olan karışımlar elde etmektir. Her bir parça için belirli karıştırma süresi, hızı ve sıcaklığı vardır. Karıştırma işlemi çeşitli karıştırıcılarda yapılır. Karıştırma işlemi tekerlek lastiğinin kalitesini ciddi bir şekilde etkilemektedir. Hammaddelerin çok fazla karıştırılması, hazırlanan hamurun çekme dayanımını azaltır, yırtılmaya dayanıklılık vb. özelliklerini ortadan kaldırır. Bu durum özellikle çok az karıştırmayı gerektiren sentetik kauçuk için gereklidir. Karıştırma işleminde öncelikle polimerler ve



Şekil 2.5: Lastik üretimi akış şeması [20]

peptizer, sonrasında karbon siyahı ve yağlar, daha sonrasında ozonlaştırmayı engelleyici maddeler ve dolgu malzemeleri ve en sonunda da vulkanizasyonu sağlayan bileşimler eklenir. Karıştırma işleminden sonra bileşimler suyla ya da hava yardımı ile soğutulabilir [5,20].

Haddeleme işlemi genel olarak:

- Karıştırıcıda karıştırılmış olan gövde karışımının levha haline getirilmesi,
- Kord bezinin gövde karışımı ile kaplanması
- Kaplanmış malzemenin ezilmesi

işlemlerinden meydana gelir [5].

Karışım, üç merdaneli bir haddeleme tezgahında levha haline getirilir. Şekil verme işlemi tezgahın üst iki merdanesinde gerçekleşirken, alt merdane taşıma işlemini gerçekleştirmektedir. Kaplama işlemi ise, üç veya dört merdaneli haddeler üzerinde yapılır. Üç merdaneli haddeler kord bezinin bir yüzünü, dört merdaneli haddeler ise, her iki yüzünü kaplamada kullanılır. Kaplama işleminde kord bezi kauçukla kaynaştırılır. Kaplanmış malzemenin ezilmesi ise, kord bezi ile onu kaplayan malzeme arasındaki haddeleme hız farkı ve merdane açıkları yüzünden ortaya çıkan boşlukların malzemenin kendisi ile doldurulması ile sağlanır. Haddeleme işlemi bittikten sonra çeşitli ebatlarda kesilerek montaj aşaması için hazır hale getirilir [5,7,20].

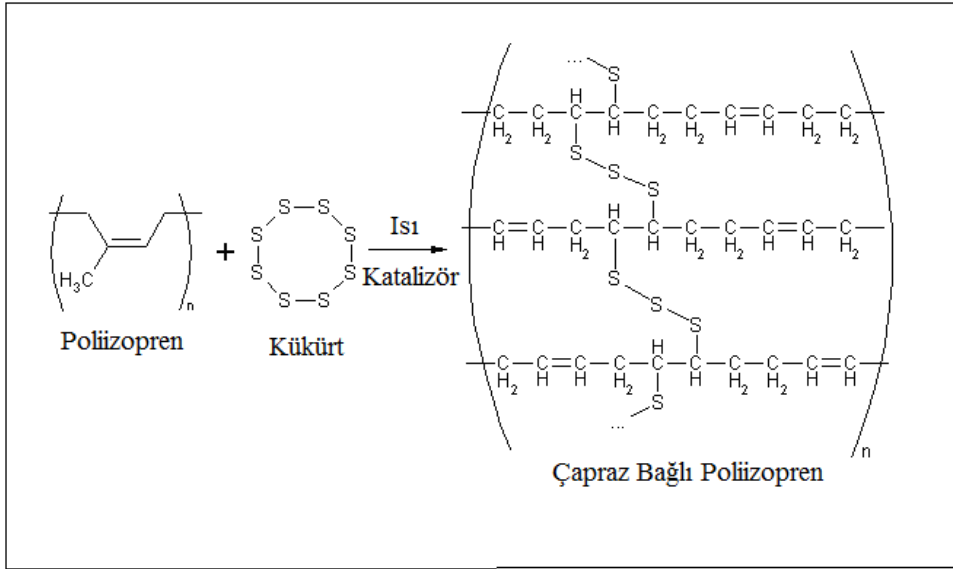
Çekme işlemi çekilmesi istenen ürün profilini verecek kalıbın budinöze (ekstruder) bağlanması ile gerçekleştirilir. Her ürün için kullanılan kalıplar farklıdır. Çekilecek malzeme sıcak veya soğuk olarak budinöze verilebilir. Vulkanize olmamış lastik karışımlarının fazla miktarda esnek eleman içermeleri, karışımların çekme kalıbından geçerken büyük bir genişleme gücüne maruz kalmalarına yol açar. Bu nedenle kalıbın ölçüsü, karışımın genişleme özelliğine göre saptanır [5,7,20].

Montaj işlemi öncesinde, lastik elemanlarına montaja gitmeden önce mümkün olduğunca son şekilleri verilir. Damak çemberi makinasında, kaplanmış damak teli lastik tekerlek boyutlarına uygun şekilde bir çember elde etmek amacıyla sarılır. Haddeleme kademesinde elde edilen gövde katları, belli genişlik, açısı ve uzunlukta çapraz olarak kesilir. Çekme kademesi sonucu elde edilen sırt ve yanak malzemesi ise, belli ebatlarda kesilerek montaja hazır duruma getirilir. Montaj kısmında ise, ayrı ayrı elde edilmiş olan kısımlar birbirlerine bağlanır. Tekerlek lastiği sönebilen ve

dönebilen bir tambur üzerine monte edilir. Öncelikle birinci gövde katı tambur üzerine yerleştirilir. Uçlar, ikinci kat kordu ilk kata 90° açıda gelecek şekilde birbirlerinin üzerine yapıştırılır. Daha sonra damak teli çemberleri ve son kat sargı bezinin uçları, gövde katları üzerine yerleştirilir. Damak tellerinin üzerine gövde katlarının uç parçaları katlanır. Bu işlem diğer gövde katları için de tekrar eder. Gövde katlarının üzerine takviye katları yerleştirilir. Şekil verildikten sonra, uygun ebatlarda kesilmiş olan, birbirlerine yapışık haldeki yanak ve sırt lastiklerinin uçları birleştirilerek bir bant haline getirilir ve gövdenin üzerine yapıştırılır. Çapraz katlı lastiğin üretiminde çeşitli bölümlerde hazırlanan sırt kat bezleri, damak telleri gibi parçalar imalat makinelerinde birleştirilerek ham lastik meydana getirilir. Bu işlem süresi lastik boyutlarına göre değişmekle beraber, tek makine üstünde bir etapta tamamlanır [5,20].

Şekil verme ve vulkanizasyon işlemi tamburdan çıkarılan silindir şeklindeki lastiğe optimum esneklik ve dayanıklılığın kazandırılması için uygulanır. Tamburda montajı gerçekleştirilen tekerlek lastiği, pişirme işleminin yapıldığı pres içine yerleştirilir. Lastiğin iç kısmı sıcaklığa dayanıklı bir torba ile kaplanırken, dış kısımda tekerleğin son dış şeklinin kalıbı yer almaktadır. Pişirme işlemi torba içini dolduran maddenin iletmediği ısı ile yapılır. Vulkanizasyon işlemi çoğunlukla kükürt eşliğinde ve karbon siyahının etkisinde gerçekleşir. Kauçuk içerisine dağılan toz kükürt doymamış çifte bağ içeren kauçuk moleküllerini $-C-S-C-$ bağlarıyla birbirine çapraz olarak bağlar. Karbon siyahı bu reaksiyonun hızlanmasını sağlar. Isıtma işlemi bozunmayı önlemek için basınç altında yapılır. Pişirme süresi lastik gövdesinin ve sırt kısımlarının kalınlıkları ile doğru orantılıdır. Bu işlem bir binek arabası için 30-40 dakika sürerken daha büyük bir traktör arka lastiği için birkaç saat sürebilir. Isıtılarak vulkanizasyona tabi tutulan lastik soğutulduktan sonra kalıptan çıkarılır ve böylece şekil verme ve pişirilme işlemi sonlanmış olur [5,7,15]. Şekil 2.6'da kauçuğun kükürt ile vulkanizasyon reaksiyonu gösterilmiştir.

Lastiğin istenilen özelliklere sahip olup olmadığının belirlenmesi için lastiğin son kontrolleri yapılır. Lastikler göz ve X ışını ile kontrol edilip çeşitli testlere tabi tutulurlar. Kontrolden geçen lastikler nakliye için hazır durumdadırlar [20].



Şekil 2.6: Poliizoprenin kükürt ile yapılan vulkanizasyon reaksiyonu [21].

2.2 Türkiye ve Dünya Lastik Endüstrisi

Otomotiv sektörü ülkemiz ve dünya ekonomisi için çok önemli bir itici güçtür. Türkiye ve dünya için lastik sektörü de otomotiv sektöründen doğrudan etkilenmektedir. Türkiye için otomotiv sanayisinin üretim değerlerine baktığımızda ekonomi için ne kadar önem taşıdığı anlaşılabilmektedir. Otomotiv Sanayii Derneği'nin (OSD) 2008 yılı raporuna göre Türkiye'de 2008 yılında bir milyon iki yüz binden daha fazla ticari araç üretilmiş olup yıllara göre üretim değerleri sürekli artış eğilimindedir. Otomotiv sektörünün ülkemiz ekonomisine yaptığı katkı ihraç edilen miktarlar ile 22 milyar ABD dolarından fazladır [1]. Lastik üretimi de otomotiv sanayisi gibi artış eğilimi göstermektedir. Ülkemizde 4 adet lastik üretici firma bulunmaktadır. Bu firmalar Türk Pirelli Lastikleri A.Ş., Goodyear Lastikleri A.Ş., Petlas Lastik Sanayi Ticaret A.Ş. ve Brisa Bridgestone Lastik Sanayi ve Ticaret A.Ş. şeklindedir [5]. Çizelge 2.2'de, bu firmaların mevcut en son bilgilere göre 2002-2005 yılları arasındaki toplam üretim değerleri ve kapasite kullanım oranları (KKO) ve Çizelge 2.3'te ise, 2005 yılı ayrı ayrı üretim miktarları adet olarak verilmiştir.

Çizelge 2.2: Türkiye için yıllara göre lastik üretim ve KKO [5].

	2002	2003	2004	2005
Kapasite (Adet)	20 891 794	22 452 559	24 769 397	26 347 065
KKO (%)	74	75	79	85
Kapasite (ton)	331 455	351 544	381 614	419 822
KKO (%)	73	77	78	86

Çizelge 2.3: Türkiye’de faaliyet gösteren lastik üreticilerinin 2005 yılı üretimi [5].

Firma	2005 Yılı Üretimi (Adet)
Türk Pirelli	10 141 000
Goodyear	7 163 029
Petlas	1 463 000
Brisa Bridgestone	7 500 000

Yurt içinde üretilen yaklaşık 22,5 milyon lastiğin yaklaşık 10 milyonu yurt içerisinde pazara sunulurken geriye kalan miktar yurt dışına ihraç edilmiştir [5]. Üretim miktarı 2008 yılı içinse 25 milyondur [22].

Dünya lastik üretimi ise, 1998 yılında 700 milyon adet olarak belirlenmiştir [5]. 2007 yılında ise, 1,29 milyar adet lastik satılmışken bu miktarın % 73’ü yeniden kaplanan lastiklerdir [23].

2.3 Atık Lastik

Kullanım esnasında, yol ile lastik arasında oluşan sürtünme kuvvetleri nedeniyle lastikler aşınır. Bu aşınma lastiğin ağırlığının ortalama %10-20’sine tekabül eder. Bu miktar binek otomobil lastikleri için 1 kg iken otobüs ve kamyon lastikleri için 8-10 kg civarındadır. Bu aşınmalarla beraber lastiklerin dış derinliğinde azalma meydana gelir. Lastiklerin dış derinliği belirli bir değere düştüğü zaman (bu değer binek araç lastikleri için 1,6 mm’dir) lastiklerin araç altında kullanımı tehlikelidir. Fakat bazı lastikler araçtan söküldükten sonra kaplanarak yeniden kullanıma hazır hale getirilebilir. Özellikle otobüs ve kamyon lastikleri kaplama için daha uygundur.

Lastikler araç altından söküldükten sonra ya kullanılmış ya da ömrünü tamamlamış lastik olarak adlandırılırlar. Kaplamaya uygun olmayan, faydalı ömrünü tamamlamış, orijinal veya kaplanmış, araçlarda tekrar lastik olarak kullanılamayacak durumda olan ve üretim esnasında standartlara uymayan bütün veya parça lastikler ömrünü tamamlamış, atık lastik olarak adlandırılmaktadır [3,6,24,25].

2.3.1 Türkiye ve dünya için atık lastik verileri

Sürdürülebilir Kalkınma için Dünya İş Konseyi'nin 2008 yılında yayınladığı rapora göre dünyada her yıl yaklaşık olarak 1 milyar adet atık lastik oluşmaktadır. 2005 yılında sadece Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) yaklaşık olarak 300 milyon adet atık lastik oluşmuştur. Bu rakam yaklaşık olarak 4,46 milyon ton lastiğe tekabül etmektedir. Avrupa Birliği'nde (AB) bu rakam 2006 yılında 2,8 milyon tondur. Ülkemizde ise, her yıl yaklaşık olarak 200 bin ton atık lastik oluşmaktadır. Diğer ülkeler de göz önüne alındığında her yıl dünyada yaklaşık olarak 10 milyon tondan daha fazla atık lastik oluşmaktadır [24,26-28]. Yasal mevzuatlara rağmen ülkemizdeki atık lastiklerin çoğunluğu, gelişmiş ülkeler de dahil olmak üzere, diğer ülkelerde de bir kısmı doğaya doğrudan verilmektedir. Bu işlem ile atık lastikler çevre için ciddi tehditler oluşturmakta ve bu lastiklerin atık yönetiminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. ABD'de resmi olarak depolama alanları ile doğaya verilmiş atık lastik sayısı 1990'ların başında 1 milyar iken bu sayı 2005 yılında 188 milyona düşmüştür. Her ne kadar resmi bilgiler bu rakamı gösterse de, kanunsuz bir biçimde doğaya verilen atık lastiklerle beraber bu rakamın 2-3 milyar arasında olduğu genel kabul görmektedir. Aynı şekilde AB'de de birikmiş atık lastiklerin yasal ve kanunsuz olarak doğaya verilen miktarlarının da yaklaşık olarak 2-3 milyar arasında olduğu tahmin edilmektedir. Türkiye'de ise, bu sayının milyonlar civarında olduğu düşünülmektedir [27,29].

2.3.2 Atık lastik ve çevre

Atık lastiklerin doğrudan yerküreye verilmesiyle oluşabilecek çeşitli sorunlar yapılan araştırmalarla incelenmiştir. Bu araştırmalar lastiklerin stok yığını olarak kullanıldığı yerlerden alınan toprak ve yer altı suyu numuneleri ile yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda kısa süreli temasta ve pH değeri 7 olan ortamda herhangi bir çevresel etkiye rastlanılmamıştır. Fakat temas süresi arttıkça sınır değerlerin aşıldığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde, asidik ortamda metal iyonlarının nötr veya bazik

ortamlara göre daha fazla sızdığı, bazik ortamda ise, organik maddelerin çözünmesinin arttığı görülmüştür. pH 3.5 değerinde bekletilen atık lastiklerde, lastik yapısında bulunan çinko, baryum, kadmiyum gibi metallerin konsantrasyonunun sınır değerlerini aştığı ortaya çıkmıştır. Atık lastiklerin yeraltı suyu ile temasta bulunduğu bir çok durumda ise, toprağın pH durumuna bağlı olarak içme suyu değerlerinin standartların sınır değerleri dışına çıktığı saptanmıştır. Başka bir çalışmada ise, atık lastik tozları 10 gün gibi uzun bir süre ile aynı suyla temas ettirilmiş ve oluşan sızıntı nedeniyle sucul mikroorganizmalara ve böcek-kurtçul boyutundaki canlılara zarar verdiği gözlemlenmiştir [2,6].

Toprak ve yeraltı suyuna etki etmesinden daha çok, atık lastiklerin doğrudan yer küreye verilmesi taşıdığı yangın riskleri ve depolama alanlarının hastalık taşıma riski taşıyan sivrisinek ve benzer böceklerin uygun ortam oluşturması nedeniyle çevre ve insan sağlığına tehdit oluşturmaktadır [2,6].

Lastik yangınlarının kontrolü, açığa çıkan yüksek ısı, oluşan yoğun duman ve stok sahalarındaki yüksek lastik sayısı nedeniyle oldukça zordur. Bazı yangınlar aylarca sürmektedir. Bu yanma ile beraber atmosfere büyük miktarda zararlı bileşik verilmektedir. Bu bileşikler içerisinde karbon siyahı, uçucu organik bileşikler, kükürt ve azot oksitleri, polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH), nitrosaminler ve uçucu partiküller bulunmaktadır. Fenoller, PAH'lar, çinko ve demir içeren bileşikler ise, yeraltı sularına ve nehirlere sızabilirler. Yağmur suyu ya da yangını kontrol etmek için kullanılan su, bu maddelerin toprağa geçmesine veya etraftaki diğer su kaynaklarına akmasına neden olur. Yangını kontrol etmek için kullanılan su, lastiklerin oksijenle temasını keserek pirolizine sebep olur. Piroliz sonucu oluşan hidrokarbonların toprağa sızma riski bulunmaktadır. Yangın sonrası kalıntıların da toprağı kirletme potansiyeli bulunmaktadır [2,6,27,29]. Şekil 2.7'de ABD'nin Kaliforniya eyaletinde çıkan ve söndürülmesi aylar süren bir lastik yangını gösterilmektedir.



Şekil 2.7: 1999 yılında ABD'nin Kaliforniya eyaletinde çıkan lastik yangını [29].

Atık lastik yığınları, lastik boşluklarının yağmur suyunu tutması nedeniyle sivrisinek ve çeşitli böceklerin üremesine uygun ortam oluşturmaktadır. Bu böcekler salgın hastalıkları taşımakta ve bu hastalıkların bazıları ölümcül olabilmektedir [2,6,29]. Görüldüğü gibi atık lastikler, hem çevre hem de insan sağlığı için önemli bir tehdit oluşturmakta ve atık yönetiminin kesinlikle yapılması gerekmektedir.

2.4 Atık Lastik Yönetimi

Günümüzde atıkların çevreye olan zararlarını en aza indirmek için uygulanan atık yönetimi hiyerarşisi sırasıyla atığın oluşumunu engelleme, atığın oluşumunu azaltma, atığı yeniden kullanma, atığı geri dönüştürme, atıktan enerji geri kazanımı ve depolama şeklindedir. Atık lastik yönetiminde öne çıkan yöntemler ise, ekonomik maliyetlere ve endüstriyel kullanıma bağlı olarak değişmektedir. Atık lastik yönetiminde genel olarak:

- Geri dönüşüm
- Yeniden kullanım
- Depolama

- Geri kazanım
 - Enerji geri kazanımı (yakma)
 - Malzeme geri kazanımı

yöntemlerinden oluşmaktadır [6,26,28]. Şekil 2.8’de atık lastik yönetimi şematik olarak gösterilmiştir. Çizelge 2.4’te çeşitli ülkeler ve Türkiye için ihraç edilen ve yeniden kaplananlar hariç, atık lastik miktarları ve değerlendirme yöntemleri, Şekil 2.9’da ABD için 2005 yılında 300 milyon adet atık lastiğin değerlendirme yöntemleri verilmiştir. Çizelge 2.4’ten de anlaşılacağı üzere gelişmiş ülkelerde atık lastik yönetiminde en çok enerji geri kazanımı tercih edilmektedir. Malzeme geri kazanımı, özellikle inşaat endüstrisi başta olmak üzere, giderek yaygınlaşmaktadır.

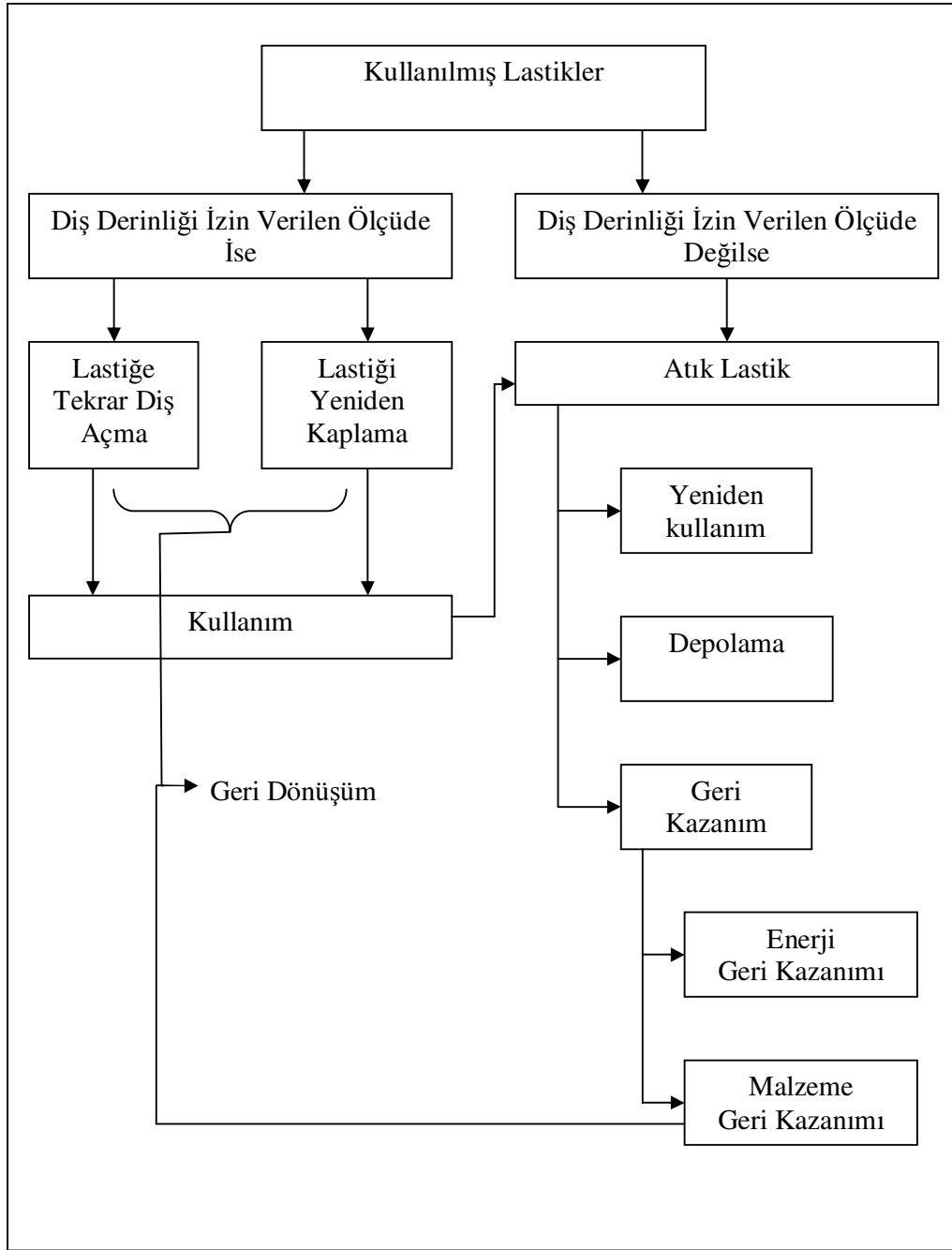
Çizelge 2.4’te gösterilen Türkiye değerlerinin eksik olmasının nedeni tutulan kayıtların yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır. Türkiye’de yaklaşık 10 bin ton lastiğin kayıt dışı olarak kullanıldığı düşünülmektedir [24].

Aşağıda atık lastik yönetimleri kısaca sunulmaktadır.

2.4.1 Geri dönüşüm

Geri dönüşüm atık lastik yönetiminde, atık lastiğin veya lastik bileşenlerini oluşturan maddelerin bir işleme tabi tutularak ilk hallerine geri dönüştürülmesi anlamını taşımaktadır [30]. Lastiği oluşturan maddelerin tekrar aynı işi yapabilecek maddeler haline getirilmesi kısmı 2.4.5 kısmında “Atık lastiklerden malzeme geri kazanımı” başlığı içerisinde incelenmiştir. Atık lastiklere bir bütün halinde geri dönüşüm uygulanamazken, kullanılmış lastikler için geri dönüşüm ise, kullanılmış lastiğe tekrar dış açılması ya da lastiğin yeniden kaplanması ile gerçekleşir. Gövde yapısında herhangi bir zedelenme bulunmayan fakat taban kısmında aşınma olan lastikler kaplanabilirler. Fakat kaplama işlemi için bazı kriterler bulunmaktadır ve hem kaplama hem de dış açma işlemi genellikle otobüs-kamyon lastikleri için uygulanır [6,27].

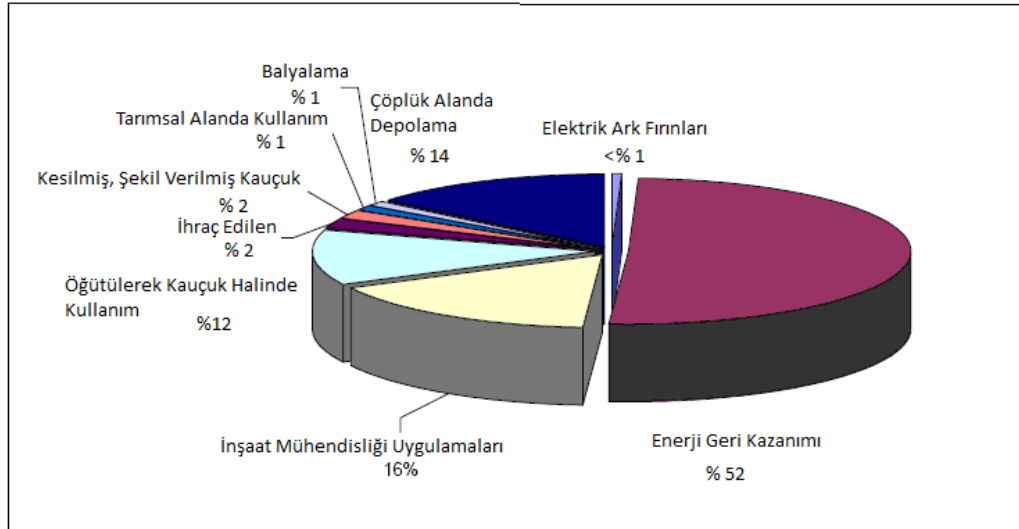
Kullanılmış lastiğe yeniden dış açma işleminde, oluklarında yeterli dış derinliğine sahip olan kamyon lastiklerine tekrar dış açılarak lastik geri dönüşümü sağlanmış olur [6].



Şekil 2.8: Atık lastik yönetimi [2,6,26-28]

Çizelge 2.4: Çeşitli ülkeler ve Türkiye için ihraç edilen ve yeniden kaplanan miktarlar hariç atık lastik miktarları ve değerlendirilme yöntemleri [24,28].

Ülke	Veri Alınan Yıl	Atık Lastik Üretimi (Milyon Adet)	Enerji Geri Kazanımı (%)	İnşaat Sektörü veya Malzeme Geri Kazanımı (%)	Çöp, Depolama ve Diğer (%)
ABD	2005	292	52	33	14
Avrupa	2006	250	41	43	16
Japonya	2006	100	70	15	15
Meksika	2004	30	0	90	10
Brezilya	-	27	69	13	18
Güney Kore	2003	23	77	16	7
Kanada	2003	22	20	75	5
Avustralya	2006	20	22	8	70
Türkiye	2008	200 bin ton	15	20	60



Şekil 2.9: ABD 2005 yılı atık lastik değerlendirme yöntemleri [26].

Kaplama işleminin yapılabilmesi için aşınmanın lastiğin sadece sırt ve yanak bölgesinde olması gerekir. Fakat, yanakta ya da sırtta çatlak ya da yarık olan lastikler kaplanamaz. Ülkemizde 50-60 kadar orta ve büyük ölçekli kaplama tesisi ile 500

civarında atölye kaplama işi yapmaktadır [5,6]. AB’de kaplanılan lastik sayısı 2006 yılında 381 bin ton iken, ABD’de 2005 yılında 16,255 milyon lastik yeniden kaplanmıştır. Ülkemizde ise, 2001 yılında 600 bin adet lastik kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir [26,27].

2.4.2 Atık lastiklerin yeniden kullanımı

Yeniden kullanma işlemi, herhangi bir atığın fiziksel, kimyasal ve diğer özellikleri hiç değiştirilmeden yeniden kullanıma sunulması demektir [31]. Lastik dış derinliği 1,6 mm’den daha az olan kullanılmış lastikler araç lastiği olarak yeniden kullanılabilirken, atık lastiklerin herhangi bir işlem görmeden yeniden araç lastiği olarak kullanımı mümkün değildir. Bununla beraber atık lastikler bir bütün olarak sanayide çeşitli şekillerde kullanılabilirler [2,6]. Kullanım alanları:

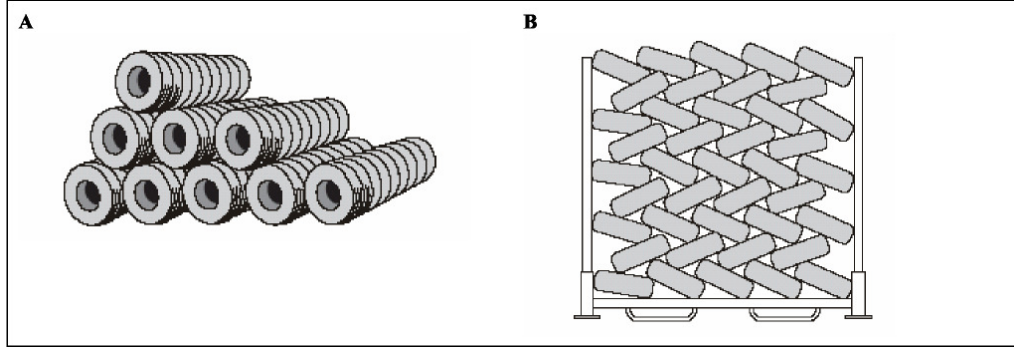
- Oyun parkları
- Motorlu spor alanları
- Deniz kıyısında gemi yanaşma noktaları
- Toprak erozyonu önleme
- Zeminin su oymasına karşı köprü ayaklarının kaplanması
- Araç park alanları
- Deniz kıyısında dalga kırıcı olarak
- Su ortamlarında canlı yaşamının gelişmesi için bentik alanda
- Şev stabilizasyonunda (çelik teller ile birbirine balyalanarak)
- Yol stabilizasyonunda (çelik teller ile birbirine balyalanarak)

şeklindedir [2,26].

2.4.3 Atık lastiklerin depolanması

Depolama atık lastik yönetimi için en az tercih edilen yöntem olmalıdır. Yukarıda da bahsedildiği gibi atık lastiklerin doğaya doğrudan verilmesi insan sağlığı ve çevre için ciddi tehditler oluşturmaktadır. Sürekli depolama yerine, sonraki geri kazanım işlemleri gerçekleştirilene kadar geçen sürede kısa süreli olarak uygulanmalıdır. Sadece, eğer atık lastiklerin herhangi bir biçimde geri kazanılması mümkün değilse, doğayla teması olmayan depolama yerlerinde depolanması faydalı olabilir. Bu yöntem için de çeşitli depolama teknikleri geliştirilmiştir. Buradaki amaç, birim başına depolanan miktarı azaltarak ve birbirinden yeterince uzak birimler şeklinde

depolayarak riskleri en aza indirmektir [30]. Şekil 2.10’da atık lastikler için en çok uygulanan depolama yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 2.10: Atık lastikler için önerilen depolama şekilleri [30].

Avrupa Birliği’nde 2006 yılından itibaren atık lastiklerin herhangi bir şekilde çöplüklere verilmesi yasaklanmıştır. 2006 yılında AB’de 600 bin tondan daha fazla atık lastik doğrudan yerküreye verilmiştir. ABD’de ise, çoğu eyalette bütün olarak atık lastiklerin çöplüklerde depolanması yasak olduğundan çoğu zaman parçalanarak depolanmaktadır. ABD’de ise, 2005 yılında 477 bin ton atık lastik doğrudan yerküreye verilmiştir [27,29]. Ülkemizde atık lastiklerin çevreye zarar verecek şekilde doğrudan veya dolaylı olarak alıcı ortama verilmesi, hangi sebeple olursa olsun vadi veya çukurlarda dolgu malzemesi olarak kullanılması ve katı atık depolama tesislerine kabulü ve depolanması yasaktır [3]. Buna karşın, ülkemizde atık lastiklerin büyük çoğunluğu çöplüklerde durmaktadır. Türkiye’de her yıl 70 bin ton lastik çöplük alanlara gitmektedir [24].

Atık lastik depolamasında kullanılan bir diğer yöntem ise, tek tip depolama yöntemidir. Bu yöntem ile, atık lastikler diğer atıklardan ayrı bir şekilde depolanır. Depolama hacmi dolduğu zaman, olası yangın ve böcek üreme riskini azaltmak için lastiklerin üzeri örtülür. Bu yöntem diğer depolama yöntemine göre daha faydalıdır [26,27].

2.4.4 Enerji geri kazanımı

Enerji geri kazanımı atık lastikler için uygulanan işlemlerden birisidir. Geri kazanım, atıkların özelliklerinden yararlanılarak içindeki bileşenlerin fiziksel, kimyasal veya biyokimyasal yöntemlerle başka ürünlere veya enerjiye çevrilmesi olarak adlandırılmaktadır [31]. Lastikler yüksek ısı değeri ve maliyetinin diğer yakıtlara göre oldukça düşük olması nedeniyle endüstride yakıt olarak yaygın biçimde

kullanılmaktadır [28,30]. Çizelge 2.5’te lastiklerin kuru bazda kısa analizi, Çizelge 2.6’da ise, elemental analizi gösterilmiştir. Çizelge 2.7’de ise, lastiklerin ısı değeri ve emisyon miktarları diğer yakıtlar ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.5: Kuru bazda lastik kısa analizi, (Ağır. %’si) [12].

Uçucular	Sabit Karbon	Kül	Çelik
58,8	27,7	3,9	9,6

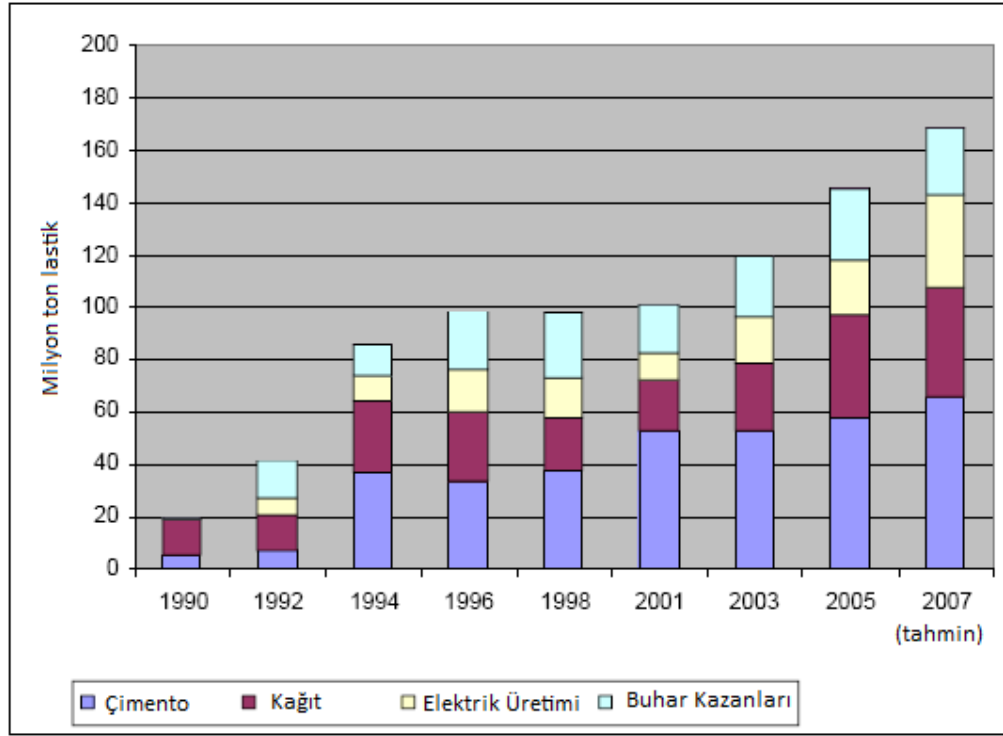
Çizelge 2.6: Kuru bazda lastik elemental analizi, (Ağır. %’si) [12].

C	H	N	S	O	Kül
74,2	5,8	0,3	1,5	4,7	13,5

Çizelge 2.7: Lastik ve çeşitli yakıtların ısı değeri ve emisyon miktarları karşılaştırması [28].

Yakıt	Isıl Değer (MJ/kg)	Emisyon Değerleri	
		kg CO ₂ /ton	kg CO ₂ /GJ
Odun	10,2	1 122	110
Kömür	27	2 430	90
Doğalgaz	39,0	1 989	51
Motorin	46,0	3 220	70
Lastik	32	2 270	85

Lastikler yakıt olarak, başta çimento endüstrisi olmak üzere, kireç fırınlarında, buhar kazanlarında, kağıt endüstrisinde ve elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Lastikler bir bütün halinde yakıldığı gibi, boyut küçültülerek de yakılmaktadır [26,32]. Şekil 2.11’de, ABD’de 1990-2005 yılları arasında lastiklerin enerji geri kazanımı olarak değerlendirilmesinin sektörlere göre dağılımı verilmiştir.



Şekil 2.11: ABD’de üretilen atık lastiklerin enerji olarak geri kazanımı [26].

ABD’de 2005 yılında üretilen atık lastiklerin % 52’si doğrudan yakma işleminde kullanılmıştır. Avrupa Birliği’nde ise, 2006 yılında bu rakam % 31’dir. Ülkemizde de çöplük alanlarında depolamadan sonra en çok kullanılan yöntem doğrudan yakma işlemidir. 24 adet çimento fabrikasının lastik yakma lisansları bulunmaktadır. Çimento fabrikalarının yanısıra halkımız da kontrolsüz olarak yakma işlemini gerçekleştirmektedir. Çimento fabrikaları 2008 yılında 30 bin ton atık lastik yakmıştır [6,24,26,27,33]

Lastiklerin gerek ısı değeri, gerekse elemental bileşimi çoğu kömüre göre daha iyi değerde olsa da, lastik yakmanın çevreye ciddi zararları bulunmaktadır. Kükürt ve azot dioksitler, ortaya çıkan yüksek PAH değerleri ve uçucular için özel emisyon kontrol cihazları kullanılmalıdır [2,34].

2.4.5 Malzeme geri kazanımı

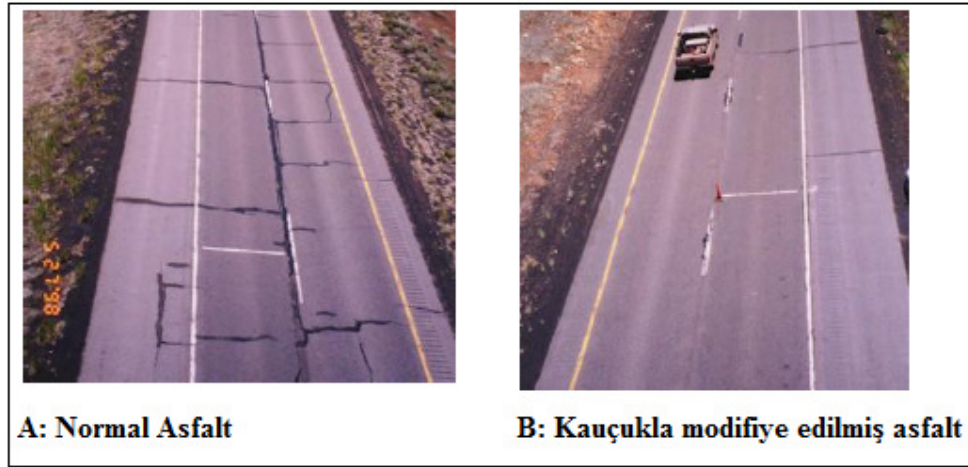
Atık lastiklerin malzeme geri kazanımı tanecik boyutu küçültme, elektrik ark fırınlarında kullanma, devulkanizasyon ve ısıl bozundurma işlemleri ile gerçekleştirilmektedir [26,30].

2.4.5.1 Tanecik boyutu küçültme

Atık lastikler, tanecik boyutu küçültülerek endüstride çeşitli şekillerde kullanılabilir. Tanecik boyutu küçültme kesme, parçalama, yongalama, granül haline getirme ve toz haline getirme işlemleri ile gerçekleştirilebilir. Tanecik boyutu küçüldükçe proses için gerekli olan enerji ihtiyacında artış olmaktadır. Endüstride daha çok içerisindeki çelik ve tekstil kuşaktan arındırılmış granül ve toz halindeki lastikler kullanılmaktadır. Granülleme işlemi kriyojenik veya atmosferik koşullarda yapılabilir. Elde edilen ürün piyasada yeniden kauçuk olarak kullanılabilen nitelikte yüksek miktarda kauçuk içermektedir. Bu kauçuk, plastik ve inşaat endüstrisinde kullanılabilir. Ülkemizde de en çok kullanılan malzeme geri kazanım yöntemi lastiğin taneciğinin küçültülerek değerlendirilmesine yöneliktir. 8 adet firmanın atık lastik değerlendirme yetkisi bulunmaktadır [29,32,35,36].

Tanecik boyutu küçültülmüş kauçuğun en yaygın kullanım alanı inşaat sektörüdür. Kauçuk katılmış beton, agrega ve asfalt yapımı ile ilgili çeşitli uygulamalar bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar, kauçuğun özellikle asfalt yapımında kullanıldığında asfaltın kalitesini arttırdığını, düşük sıcaklık yüzünden oluşan asfalt çatlamlarını ve yüksek sıcaklık nedeniyle oluşan tekerlek izlerini azalttığını, buzlanmaya karşı daha etkili olduğunu, trafikte oluşan ses kirliliğini azalttığını ve en önemlisi asfaltın kullanım ömrünü uzattığını ortaya koymuştur. Şekil 2.12’de aynı yol üzerinde bulunan normal asfalt ve kauçukla modifiye edilmiş asfalt resimleri gösterilmiştir. Aynı şekilde, yapılan çalışmalar kauçuk kullanılmış betonlarda ısı ve ses yalıtımında verim artışı olduğunu, ısı iletim katsayısının aynı ağırlıktaki normal betonlara göre daha düşük çıktığını ve sektörde kullanılan diğer ısı yalıtımı iyi olan betonlarla aynı yoğunluk ve dayanıklılık özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir [26,27,37].

Toz haline getirilmiş kauçuk inşaat endüstrisi dışında otomobil endüstrisinde; fren balatasında bağlayıcı olarak, araba kaportasında sızdırmazlık contalarında, araç içi paspas üretiminde, darbe emici olarak ve teker arkasında çamur/su sıçramasını önleyen lastik perdelerin üretiminde kullanılmaktadır. Bununla beraber, termoplastik elastomerik ürün üretiminde, spor ve oyun alanlarının yüzeylerinde de kullanılmaktadır [2].



Şekil 2.12: Normal asfalt ve kauçukla modifiye edilmiş asfaltın karşılaştırılması [27].

2.4.5.2 Elektrik ark fırınlarında kullanma

Atık lastiklerin elektrik ark fırınlarında kullanımı oldukça yeni olmakla beraber, ABD’de ilk kullanım 2003 yılında gerçekleşmiştir. Japonya’da ise, atık lastiklerin elektrik ark fırınlarında değerlendirilmesi oldukça popüler olmakla beraber, atık lastiklerin % 15’i elektrik ark fırınlarında değerlendirilmektedir. AB’de ise, kullanım miktarı ABD’den daha düşüktür. Bu yöntemde, atık lastikler yüksek karbonlu çelik üretimi için karbon ve çelik kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu işlem, sıcaklığı 1650 °C’den daha yüksek olan elektrik ark fırınlarında yapılmaktadır. Atık lastikler elektrik ark fırınları için yüksek karbon, çelik ve ısıl değer miktarı ile oldukça yararlıdır. Bu işlemin bir diğer ilgi çekici yönü ise, elektrik ark fırınlarının bütün halinde olan lastikleri bile kullanıyor olabilmesidir [26].

Bu işlemde, atık lastiklerin yanabilir kısmı enerji kaynağı olarak kullanılırken bir kısım karbon (ağırlıkça lastiğin % 68’i) ve çeliğin büyük kısmı (ağırlıkça lastiğin % 12’si) yeni çelik üretimi için kullanılırlar. Bu prosesin en büyük avantajı karbon, çelik ve kauçuğun tamamının geri kazanılıyor olmasıdır. Fakat işletim maliyetleri oldukça yüksektir [26,30]

2.4.5.3 Devulkanizasyon

Devulkanizasyon işlemi, mekanik, ısı ve kimyasal işlemler ile kauçuğun tekrar karıştırılabilir, işlenebilir ve vulkanize edilebilir hale getirilmesidir. Bu işlemde amaç karbon-kükürt bağlarının kırılmasıdır. Elde edilen kauçuğa rejenere kauçuk da

denilmekle beraber, mekanik özellikleri normal kauçuğa göre daha kötü olduğundan kullanımı sınırlıdır [6,30].

Devulkanizasyon işlemi 2 kademedен oluşmaktadır. Bunlardan ilki boyut küçültme, ikincisi ise bağların kırılması işlemidir. İkinci işlem kimyasal, ultrasonik, mikrodalga ve biyolojik olarak gerçekleştirilebilir. Kimyasal devulkanizasyon 180 °C ve 1.5 MPa'da çeşitli kimyasallar eşliğinde gerçekleşir. Ultrasonik devulkanizasyonda, tanecik boyutu küçültülmüş lastik parçaları bir ekstrudere koyulur. Ekstruderin mekanik hareketinden ortaya çıkan ısı kauçuk parçalarını ısıtır ve yumuşatır. Yumuşamış kauçuk ekstruderin boşluğunda ilerlerken ultrasonik enerjiye maruz bırakılır. Bu sayede yeterli ölçüde devulkanizasyon gerçekleşmiş olur. Mikrodalga devulkanizasyonunda, ısı enerjisi hızlı ve dengeli biçimde kauçuğa yayılır. Bu ısı sayesinde devulkanizasyon gerçekleşmiş olur. Biyolojik devulkanizasyonda ise, öğütülmüş kauçuk uygun sıcaklıkta bir biyoreaktörde bakteri tarafından gerçekleştirilir. Fakat bu işlem 10-100 gün arası sürebilmektedir. Endüstride en çok kullanılan yöntem kimyasal ve ultrasonik işlemlerdir [30].

2.4.5.4 Isıl bozundurma işlemleri

Isıl bozundurma işlemleri piroliz, karbonizasyon ve gazlaştırma olarak 3 şekilde gerçekleştirilebilirken, tüm organik maddelere uygulanabilir. Bu işlemler ile katı, sıvı ve gaz ürünler elde edilebilir [38].

Piroliz işlemi, hidrokarbonların oksijensiz ortamda ısıtılması işlemidir. Bu işlemde, sıcaklığın etkisiyle kimyasal bağlar kopar ve yerine düşük molekül ağırlığına sahip yeni bileşikler oluşur. Isıl bozundurma ile ilk önce katı ve gaz ürün elde edilir. Elde edilen gaz ürün yoğunlaştırılarak sıvı ürün ve gaz ürün haline dönüştürülür. Sıvı ürün suda çözünen fraksiyon ve yağ fraksiyonu olmak üzere 2 kısımdan meydana gelir. Lastik pirolizinde suda çözünen fraksiyon yağ fraksiyonuna göre oldukça düşüktür. Hidrokarbonların pirolizine yönelik ilk çalışmalar odunla başlamış, daha sonra kömür ve petrol ürünleri ile devam etmiştir [12,39,40,41]. Kimya endüstrisinin başlangıcı odun ve odundan elde edilen kimyasallarla başlamıştır.

Piroliz işleminde etkili olan parametreler:

- Isıtma hızı
- Sıcaklık
- Basınç
- Katalizör kullanımı ve seçimi
- Ürünlerin tepkime koşullarında alıkonma süresi ve
- Reaktör tipidir [39,41].

Şekil 2.13'te piroliz işlemi ve sonrasında oluşan ürünler gösterilmiştir. Piroliz sonucu oluşan sıvı ürünün bileşiminde hammaddelerin kimyasal yapısı önemli bir rol oynamaktadır [39,40].

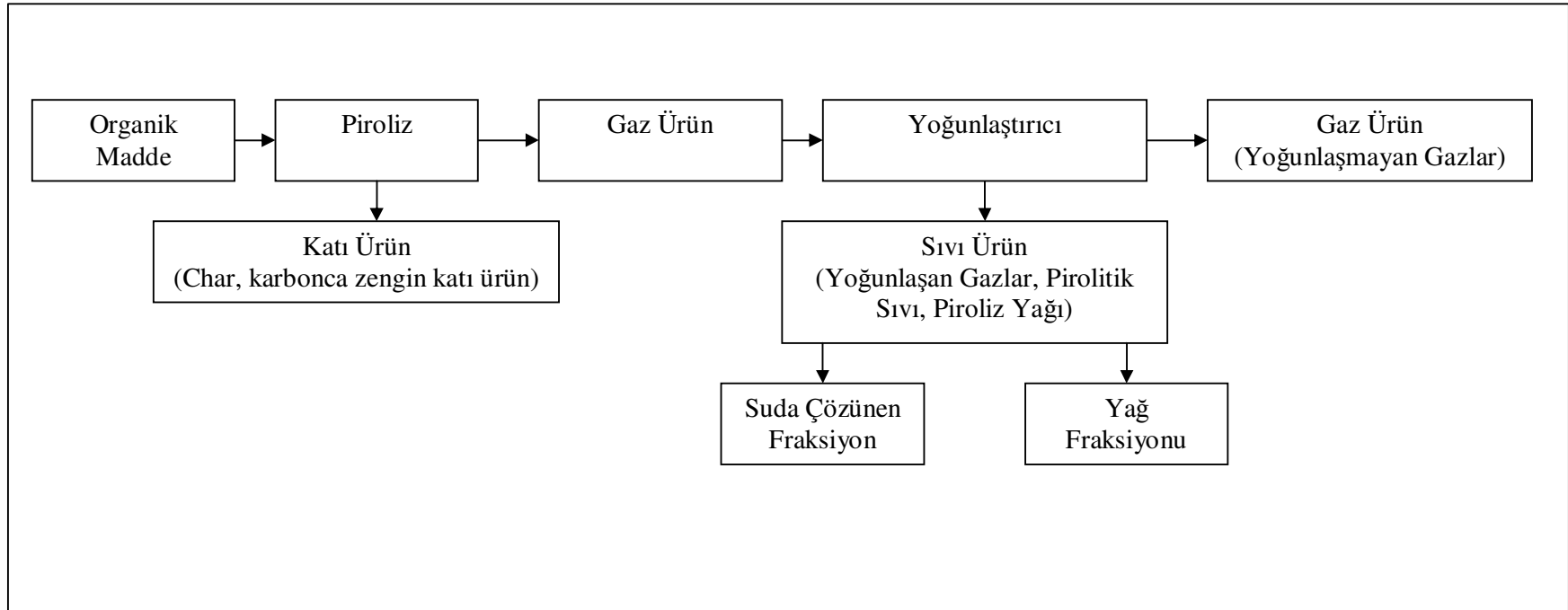
Piroliz işlemi çalışma koşullarına göre:

- Düşük sıcaklıkta piroliz $< 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ < Yüksek sıcaklıkta piroliz
- Düşük basınçta piroliz $< 75\text{ kPa}$ < Yüksek basınçta piroliz
- Düşük ısıtma oranlı piroliz $< 10^5\text{ W/m}^2$ < Yüksek ısıtma oranlı piroliz olarak adlandırılır [39].

Piroliz ısıtma hızına bağlı olarak:

- Yavaş piroliz : 10^3 W/m^2 'den daha az ısıtma oranlı ve saat mertebesinde alıkonma süreli piroliz
- Orta hızlı piroliz : 10^4 - 10^5 W/m^2 ısıtma oranlı ve dakikalar mertebesinde alıkonma süreli piroliz
- Hızlı piroliz : 10^5 - 10^6 W/m^2 ısıtma oranlı ve saniyeler mertebesinde alıkonma süreli piroliz
- Flaş piroliz : 10^6 W/m^2 'den daha fazla ısıtma oranlı ve milisaniye-saniye mertebesinde alıkonma süreli piroliz

olarak adlandırılmaktadır [39].



Şekil 2.13: Piroliz ve ürünleri [39,41].

Piroliz işleminde sıcaklık arttıkça sıvı ürün bozunarak gaz ürün oluşturur. Katı ürün düşük ısıtma oranı, düşük sıcaklık ve uzun alıkonma süresinde artmaktadır. Sıvı ürün ise, orta sıcaklıklarda düşük basınç ile artar. Vakum altında gerçekleştirilen pirolizde ise, ısıl bozunma sonucunda oluşan hidrokarbonların tepkimede kalma süresi çok düşük olduğu için istenmeyen ikincil reaksiyonların oluşma ihtimali azalmaktadır. Sonuç olarak pirolizde;

- Düşük sıcaklık katı ve sıvı ürünün
- Yüksek sıcaklık gaz ürünün
- Düşük ısıtma oranı katı ve gaz ürünün
- Yüksek ısıtma oranı sıvı ürünün
- Kısa alıkonma süresi sıvı ürünün
- Uzun alıkonma süresi ise, gaz ürünün verimini arttırmaktadır [39,42].

Günümüz teknolojisinde büyük tanecik boyutuna sahip olan maddeler için sabit yataklı ve sıcak gaz geri dönüşümlü reaktörler kullanılırken, tanecik boyutu küçük maddeler için döner fırınlı, akışkan yataklı ve taşınımlı yatak kullanımı gibi gelişmiş piroliz reaktörleri kullanılmaktadır. Bu sistemler, yavaş, hızlı, flaş ve plazma piroliz ile vakum altında da gerçekleştirilebilir [38,39,41].

Atık lastikler için en uygun ısıl bozundurma işlemi piroliz olmakla beraber, bu konu Bölüm 2.5'te "Atık Lastiklerin Pirolizi" başlığı altında daha detaylı bir biçimde incelenmiştir.

Organik maddenin ısıl bozundurulması, karbonca zengin katı ürün verimi yüksek olacak şekilde gerçekleştirilirse karbonizasyon olarak tanımlanır. Karbonizasyon, piroliz işleminin bir safhasıdır. Eğer piroliz düşük sıcaklıkta gerçekleştirilirse, karbon içeriği düşük fakat yüksek verimde katı ürün elde edilirken, sıcaklık yükseldikçe karbon içeriği yüksek fakat düşük verimde katı ürün elde edilir. Karbonizasyon işlemi bilinen en eski ısıl bozundurma işlemi olmakla beraber odun kömürü eldesi için yüzlerce yıldır kullanılmaktadır. Atık lastiklerin karbonizasyonu da çeşitli sıcaklıklardaki piroliz işlemi ile gerçekleştirilir [38,43,44].

Gazlaştırma işleminde, hidrokarbonlardan karbon monoksit ve hidrojen başta olmak üzere karbon dioksit, metan, etan ve etilen karışımı gaz elde edilir. Gazlaştırma işleminde hava, oksijen, su buharı, hidrojen veya karbon dioksit gazlaştırma ajanı olarak kullanılabilir. Gazlaştırma işlemi daha çok yüksek sıcaklıkta piroliz, buharla

reformlama ve kısmi oksidasyon reaksiyonları ile gerçekleştirilir. Reaksiyon sıcaklığı 700-800 °C arasında olan gazlaştırıcılar bulunmakla beraber çoğu gazlaştırıcılar 1200-2000 °C gibi yüksek sıcaklıklarda çalışır. Gazlaştırma sonucu elde edilen CO ve H₂ karışımına sentez gazı da denilmektedir ve elde edilen sentez gazı yakıt olarak kullanılabilir gibi, çeşitli katalitik reaksiyonlarla da çeşitli kimyasallara ve alternatif yakıtlara dönüştürülebilir. İşlem sonrası elde edilen katı ürün karbon siyahı ya da aktifleştirilerek aktif karbon olarak kullanılabilir. Atık lastik gazlaştırılması buhar ve oksijen ortamında laboratuvar ortamında denenmiş ve buharla gazlaştırma deneyinde gaz ürün dönüşümü % 60 olarak bulunmuştur [45-49]. Fakat gazlaştırma işleminin bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar:

- Lastik bileşimini oluşturan moleküllerin kararlı ağır organik moleküller olmalarından dolayı temiz sentez gazı eldesinin oldukça zor olması ve
- İşletim ve yatırım maliyetlerinin oldukça yüksek olmasıdır [49].

2.4.6 Türkiye, AB ve ABD için atık lastik yasal mevzuatı

Ülkemizde atık lastiklerin yönetimi T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından çıkartılan ve 26 Kasım 2006 Cumartesi günü 26357 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan “Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği” ile belirlenmiştir. Bu yönetmelik ile atık lastiklerin:

- Çevreye zarar verecek şekilde doğrudan veya dolaylı olarak alıcı ortama verilmesinin önlenmesine,
- Toplama ve taşıma sisteminin kurulması, yönetim planının oluşturulması ve ömrünü tamamlamış lastiklerin yönetiminde gerekli düzenlemelerin ve standartların sağlanmasına,
- İthalatı, ihracatı ile transit geçişine ilişkin sınırlama ve yükümlülüklerle yönelik idari ve teknik esasların belirlenmesi amaçlanmıştır [3].

Bu yönetmelik;

- Atık lastiklerin geri kazanımını esas kılmakta,
- Geri kazanım ve bertaraf işlemlerinin, hava, su, toprak, bitki ve hayvanlar üzerinde tehlike yaratmadan, ses ve koku yoluyla çevreye herhangi bir olumsuz etkide bulunmadan ve doğal çevre ile koruma alanlarına zarar vermeden yapılmasını zorunlu kılmakta,

- Atık lastiklerin ithalatını, atık lastiklerin hangi sebeple olursa olsun vadi veya çukurlarda dolgu malzemesi olarak kullanılmasını, katı atık depolama tesislerine kabulü ve depolanmasını, ısınmada kullanılmasını, gösteri ve benzeri fiilleri kapsayacak şekilde her ne amaçla olursa olsun yakılmasını engellemekte,
- Atık lastiklerin lastik tamirhaneleri, kaplamacılar, perakende satış noktaları, oto sanayi ve benzeri yerlerde açık alanda biriktirilmesini yasaklamakta ve
- Biriktirme yerlerinde yangına, sivrisinek, fare gibi zararlıların üremesine ve toprağa sızıntı ihtimallerine karşı önlem alınmasını zorunlu kılmaktadır [3].

Yönetmelik uyarınca lastik üreticileri her yıl bir önceki yıl iç piyasaya sürülen lastik tonajını hesaba alarak 2009 yılında bu lastiklerin % 40'ını, 2010 yılında % 45'ini, 2011 yılında % 50'sini ve ondan sonraki senelerde Bakanlığın ortalama lastik aşınma oranını dikkate alarak belirleyeceği oranlarda atık lastikleri toplamak/toplatmak, toplanan miktarın geri kazanımını veya bertarafını sağlamak ve bu işlemleri Bakanlığa belgelemekle yükümlü hale getirilmiştir [3].

AB'de atık lastikler için geçerli olan yasal mevzuatlar çeşitli yönergeler ile açıklanmış olup, genel olarak atık yönetimi başlığı altında incelenmiştir. AB için atık yönetiminde öncelik atığın önlenmesi, daha sonra atığın geri dönüşümü, daha sonra ise, atıktan enerji eldesi şeklindedir. Herhangi bir şekilde yararlanılamayan atıkların ise, çöp depolama alanlarında depolanmasına izin verilmektedir. Fakat atık lastiklerin bir bütün halinde çöp alanlarında depolanması 2003 yılından itibaren yasaklanmış, 2003-2006 yılları arasında boyutunun küçültülerek depolanmasına izin verilmiştir. 2006 yılından itibaren ise, hiçbir şekilde atık lastiklerin çöp alanlarında depolanmasına izin verilmemekle beraber, atık lastikler için uygulanan atık yönetimi, geri dönüşümünün ve geri kazanımının sağlanmasıdır [50,51].

ABD'de de ise, atık lastiklere yönelik yasal mevzuatlar depolamayı terkedip, atık lastiklerden yararlanmayı teşvik etmektedir. Fakat yasal mevzuatlar her eyalet için ayrıdır. ABD'de de AB'de olduğu gibi atık lastiklerin depolanması ile ilgili yasaklamalar bulunmaktadır. 37 eyalette atık lastiklerin bütün halinde çöp alanlarında depolanması yasaklanmışken, 9 eyalette boyutu küçültülmüş lastiklerin de depolanması yasaklanmıştır. 37 eyaletin, depolama alanlarında mevcut halde bulunan atık lastikler için temizleme programı vardır. Bunların 20'si aktif bir biçimde ilerlemektedir. 32 eyalet, atık lastikleri geri dönüşüm ya da geri kazanım

gerçekleştiren firmalara temin etmeyi taahhüt etmektedir. Bununla birlikte 35 eyalet atık lastikler için, lastik başına 0,25-4 ABD doları arasında vergi toplamaktadır [52].

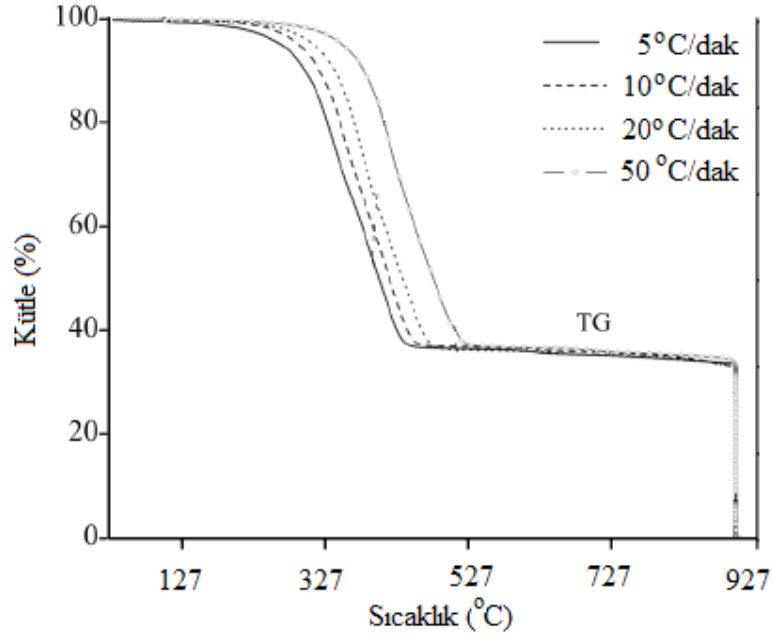
2.5 Atık Lastik Pirolizi

Piroliz işleminin tarihi Eski Mısır'a kadar uzansa da, piroliz işlemine dair ayrıntılı çalışmalar son 150 yılda kömür ve petrolün endüstride hızla kullanılmasıyla başlamıştır. Lastik pirolizine ilişkin çalışmalara ise, son 20 yılda başlanmıştır. Her ne kadar pirolizin tarihi bu kadar eskiye dayansa da, piroliz sırasında gerçekleşen reaksiyonlar için genel bir tanımlama yapmak zordur. Yine de piroliz sırasında, dehidrasyon, depolimerizasyon, dehidrojenerasyon, kraking, radikal oluşumu ve yeni bileşiklerin oluşması gibi reaksiyonların olduğu bilinmektedir [38,40,41,53].

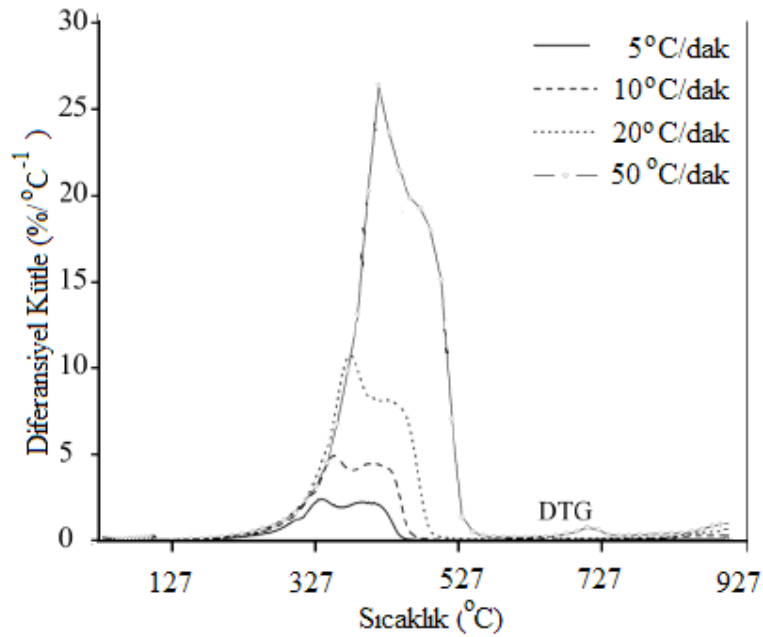
Atık lastik pirolizinde oluşan katı, sıvı ve gaz ürünlerden katı ürün çoğu zaman karbon siyahı ya da char olarak adlandırılır ve bu ürün lastik üretiminde kullanılan karbon siyahı, lastik içerisinde bulunan elastomerlerin bozunması ile ortaya çıkan char ve lastiğin içerisinde bulunan ZnO gibi inorganik maddelerden oluşmaktadır. Araştırmalar, lastik yapısında bulunan elastomerlerin char dönüşümünün çoğunlukla % 4'ten daha az olduğunu ve bu char içerisinde inorganik maddenin olmadığını göstermiştir. Sıvı ve gaz ürün ise, lastiğin içerisinde bulunan organik maddelerin sıcaklık etkisiyle bozunmasından oluşmaktadır. Yüksek sıcaklığın etkisiyle bozunma sonrasında oluşan gaz ürünün yoğunlaşan kısmı sıvı ürünü, yoğunlaşmayan kısmı ise, gaz ürünü oluşturmaktadır [44,54].

Atık lastikler için piroliz kinetiğinin belirlenmesinde diferansiyel termogravimetrik analiz (DTG) ve termogravimetrik analiz (TGA) sonuçlarından yararlanılır. Şekil 2.14'te atık lastiklerin çeşitli sıcaklıklarda TG, Şekil 2.15'te ise, DTG eğrileri gösterilmiştir. Bu analizlere göre, lastikler için ısıl bozundurma ısıtma hızından bağımsız olarak yaklaşık 227 °C'de başlamakta ve yaklaşık olarak 577 °C'de sona ermektedir. Isıl bozundurma, lastik bileşimini oluşturan NR, SBR ve BR'nin art arda seri biçimde bozunmasıyla gerçekleşmektedir [55]. Lastik üretiminde kullanılan NR, SBR ve BR'nin 10 °C/dak ısıtma hızında DTG analizleri ise, Şekil 2.16'da verilmiştir. NR'nin DTG analizinde tek bir adet zirve noktası görülmüş olup, bu nokta 378 °C'de gerçekleşmiştir. SBR'de ise, ısıl bozunma 2 kademe gerçekleşmiş olup, ilk kademe 180-360 °C arasında SBR'nin içeriğinde bulunan katkı maddelerin uçuculaşması ile, ikinci kademe ise, 458 °C'de SBR'nin bozunması

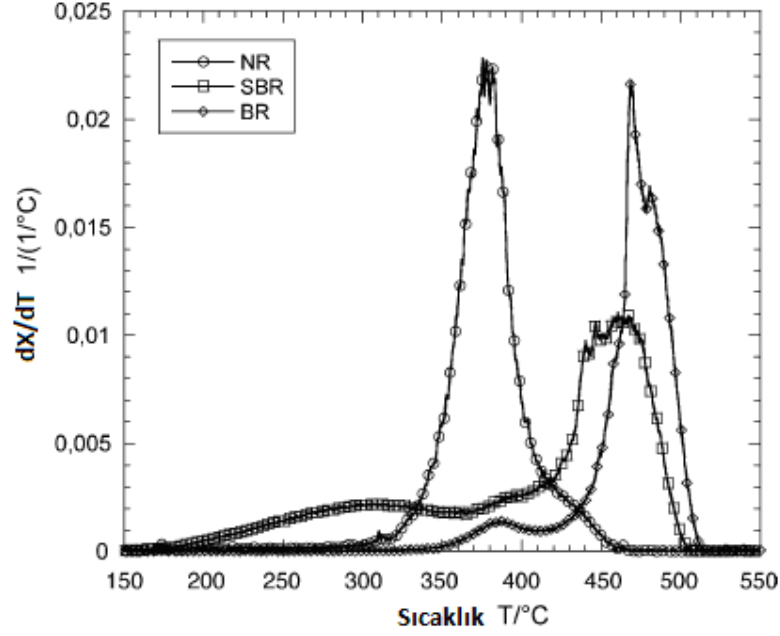
ile gerçekleşmiştir. BR için de ısıl bozunma 2 kademede gerçekleşmiş olup, ilk kademe 385 °C’de depolimerizasyon reaksiyonu ile, ikinci kademe ise, 468 °C’de geriye kalan siklo ve çapraz bağlı polimerlerin bozunması ile gerçekleşmiştir. Üç kauçuk türü için de, lastik katkı maddelerinin (çinko oksit, kükürt ve karbon siyahı) DTG analizlerine önemli bir etki yapmadığı ortaya çıkmıştır [56].



Şekil 2.14: Atık lastiğin çeşitli ısıtma hızları altındaki TGA analizleri [55]



Şekil 2.15: Atık lastiğin çeşitli ısıtma hızları altındaki DTG analizleri [55]

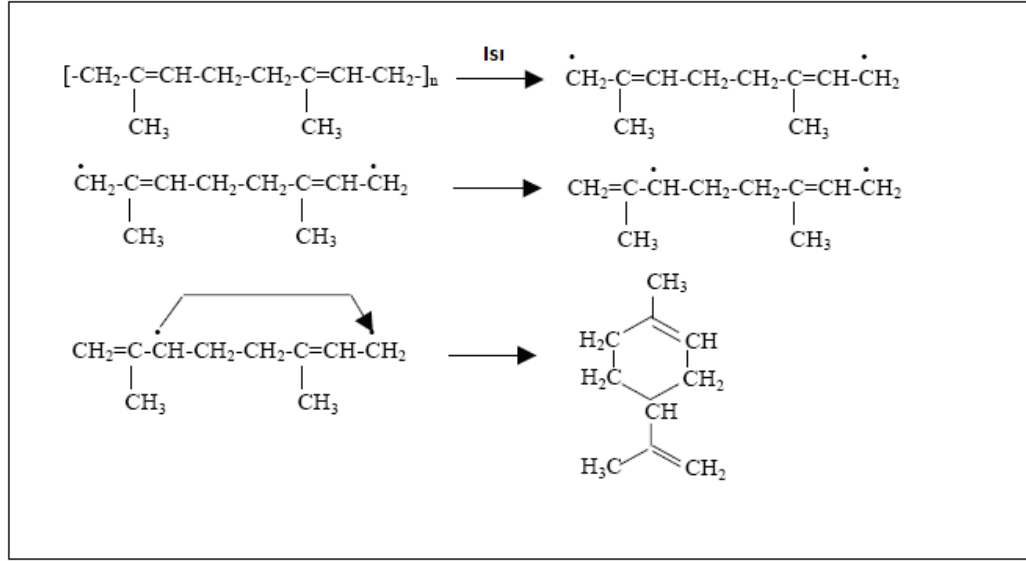


Şekil 2.16: Lastik bileşimini oluşturan NR, SBR ve BR için 10 °C/dak ısıtma hızında DTG eğrisi, x: dönüşüm oranı [56].

Piroliz sırasında NR, BR ve SBR'nin bozunmasıyla oluşan ana uçucu bileşikler Çizelge 2.8'de ve NR'den limonen oluşumu Şekil 2.17'de verilmiştir.

Çizelge 2.8: NR, BR ve SBR'nin bozunmasıyla oluşan ana bileşikler [55,57]

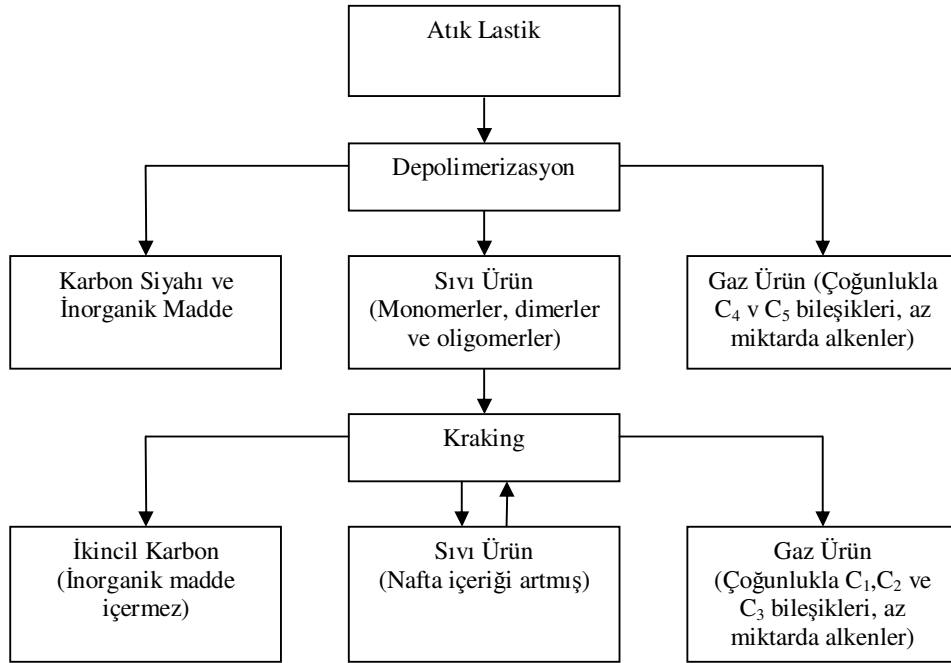
Kauçuk Türü	NR	BR	SBR
Oluşan Bileşikler	2-Metil-1,3-bütadien	Bütadien	Toluen
	2-Metil-1-büten	4-Vinil-sikloheksen	Stiren
	1-Penten	Sikloheksen	Benzen
	1-Hekzen	Siklopenten	Etilbenzen
	2-Metil-1-penten	Sikloheptadien	Parafin (C ₅ -C ₉)
	2-Metil-1-hekzen	Limonen	Sikloparafin (C ₅ -C ₈)
	Limonen		



Şekil 2.17: Piroliz sırasında doğal kauçuktan limonen oluşumu [57].

Yapılan araştırmalarda, atık lastiklerin piroliz kinetiği için çeşitli modeller ileriye sürülmüş, bu modellerin tümünde atık lastik pirolizinin birkaç kademeden oluştuğu ve tüm kademelerin birinci mertebeden reaksiyonlar olarak kabul edilebileceği belirtilmiştir. Lastik pirolizinde öncelikle depolimerizasyonun gerçekleştiği, gerçekleşen depolimerizasyon ile ara ürünlerin oluştuğu ve sıcaklık etkisiyle bu ara ürünlerin krakinginin gerçekleştiği ve çeşitli reaksiyonlar ile de son ürünlerin oluştuğu kabul edilmektedir [44,54].

Atık lastik piroliz kinetiği için öne sürülen bir modelde, piroliz reaksiyonlarının 2 kademede olduğu varsayılmaktadır. Buna göre, öncelikle lastiğin depolimerizasyonu gerçekleşir. Daha sonraki kademede ise, sıvı ürün fraksiyonunda ısı ve karbon siyahının katalitik etkisiyle kraking reaksiyonları gerçekleşir ve ikincil katı, sıvı ve gaz ürünler ortaya çıkar [54]. Bu model Şekil 2.18’de gösterilmiştir.

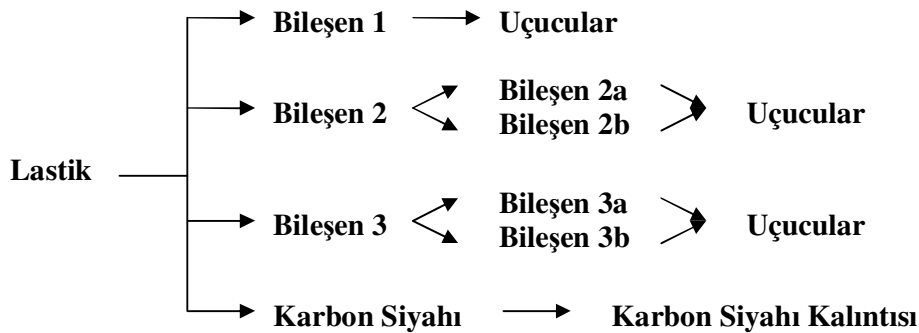


Şekil 2.18: Atık lastik pirolizi için önerilen 1. reaksiyon mekanizması [54].

Başka bir çalışmada ise, atık lastik pirolizinin genel olarak:

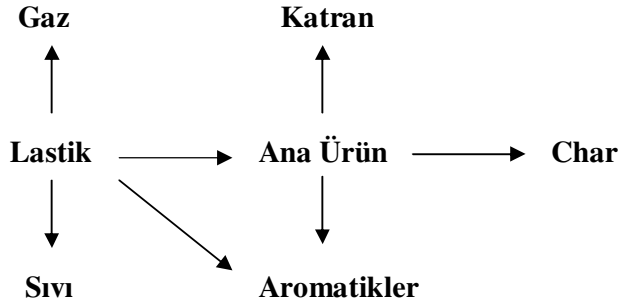


şeklinde ilerlediği belirtilmiş, karbon siyahının 500 °C altındaki sıcaklıklarda inert davrandığı varsayılmış, NR'nin bir kademede, SBR ve BR'nin ise, aromatik yapısından dolayı 2 kademede bozunduğu belirtilmiştir [44]. Bu çalışmalar neticesinde bulunan piroliz mekanizması Şekil 2.19'da verilmiştir.



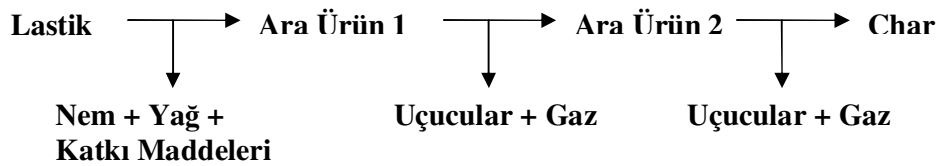
Şekil 2.19: Atık lastik pirolizi için önerilen 2. reaksiyon mekanizması [44].

Başka bir çalışmada ise, atık lastik pirolizi için önerilen mekanizmaya göre, lastiklerin öncelikle 4 paralel reaksiyon ile aromatlere, sıvı, gaz ve ara ürünlere dönüştüğü, daha sonra ise, ara ürünün 3 paralel reaksiyon ile katrana, aromatlere ve chara dönüştüğü verilmiştir [58]. Bu çalışmalar neticesinde bulunan piroliz mekanizması Şekil 2.20’de verilmiştir.



Şekil 2.20: Atık lastik pirolizi için önerilen 3. reaksiyon mekanizması [58].

Başka bir çalışmada ise, lastik pirolizinde bir çok kompleks reaksiyonun gerçekleştiği ve tam bir kinetik modellemenin yapılmasının imkansız olduğu vurgulanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, lastiği oluşturan her bir kauçuk türünün bozunmaya farklı sıcaklıklarda katkıda bulunarak uçucuları ve char bileşimini oluşturduğu gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalar ile 3 kademeli bir bozunmanın gerçekleştiği, birinci kademede lastiğin öncelikle nem, yağ, katkı maddeleri gibi özelliklerinin ayrıştığı ve birinci ara ürünün oluştuğu, ikinci kademede ise, birinci ara ürünün bozunarak uçucuları, gazları ve ikinci ara ürünü oluşturduğu, üçüncü ve son kademede ise, ikinci ara ürünün bozunarak yeni uçucular, gazlar ve charı oluşturduğu belirtilmiştir [59]. Bu çalışmalar neticesinde bulunan piroliz mekanizması Şekil 2.21’de verilmiştir.



Şekil 2.21: Atık lastik pirolizi için önerilen 4. reaksiyon mekanizması [59].

Piroliz sonucu oluşan sıvı ürün C₆-C₂₄ organik bileşiklerinin kompleks bir karışımı olup, % 53,4-74,8 arası aromatikler, % 2,47-3,5 arası azotlu bileşikler ve % 2,29-4,85 arası oksijenli bileşiklerden oluşmaktadır. Kükürt içeriği % 0,85-1,4 arasındır. İçerisinde önemli miktarda benzen, toluen, ksilen ve limonen gibi değerli hafif hidrokarbonlar ve önemli miktarlarda naftalen, fenantren, fluorenler ve difeniller gibi PAH bileşikleri bulunmaktadır [57,60]. Çizelge 2.9’da çeşitli sıcaklıklarda 15 °C/dak ısıtma hızında ağır binek otomobili lastiklerinin pirolizi ile elde edilen piroliz yağının ve karşılaştırma olarak Türkiye’de kullanılan TS 2177 standartlarındaki fuel oil özellikleri, Şekil 2.22’ de ise, 475 °C’de elde edilen piroliz yağının distilasyon eğrisi verilmiştir. Çizelge 2.9’dan görüleceği üzere, piroliz yağının özellikleri Fuel Oil No 3 ve Fuel Oil No 4 ile benzerlikler göstermektedir.

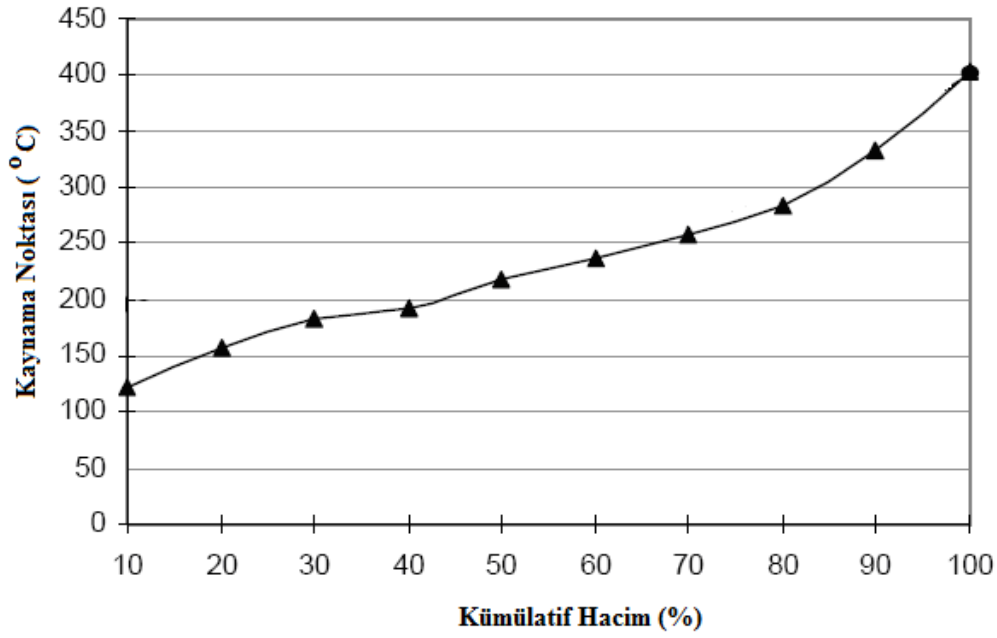
Piroliz sonucu oluşan karbon siyahının yüzey alanı ve kimyasal yapısı gibi özellikleri ticari olarak bulunan karbon siyahlarına benzemekle beraber, yapısındaki inorganik madde miktarı, ticari karbon siyahlarına göre oldukça yüksektir. Buna rağmen, elde edilen bu karbon siyahının bazı sektörlerde ticari karbon siyahının yerini alabilme potansiyeli bulunmaktadır. Bununla birlikte, asitle yıkama ile demineralizasyon gerçekleştirilip içerisindeki kül miktarı % 15’ten % 3 civarlarına düşürülebilir [61]. Çizelge 2.10’da çeşitli sıcaklıklarda piroliz sonucu elde edilen karbon siyahının özellikleri ticari karbon siyahları ile karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi, elde edilen karbon siyahları ticari olarak kullanımda olan karbon siyahlarının yerini alabilme potansiyeline sahiptir.

Piroliz sonucu oluşan gazlar ise, çeşitli hidrokarbon, karbon monoksit, karbon dioksit ve hidrojen karışımıdır. Oluşan gazların ısı değeri oldukça yüksektir ve endüstriyel ölçekte piroliz reaktörünün ısıtılmasında kullanılabilir [62,63]. Çizelge 2.11’ de piroliz sonucu oluşan gazların hacimce bileşimi ve üst ısı değeri verilmiştir. Görüldüğü gibi elde edilen gazın üst ısı değeri oldukça yüksek olup, endüstriyel uygulamalarda piroliz reaktörünün ısıtılmasında kullanılabilir.

Atık lastik pirolizi sonucunda oluşan katı, sıvı ve gaz ürün miktarları piroliz koşullarına ve reaktör tiplerine göre değişmektedir. Literatürde yapılan çeşitli koşullardaki piroliz çalışmalarının sonucu 2.6 bölümünde “Kaynak Tarama Çalışması” başlığı altında sunulmuştur.

Çizelge 2.9: Çeşitli sıcaklıklarda elde edilmiş piroliz yağı, Fuel Oil No:3 ve No:4 özelliklerinin karşılaştırılması [57,64].

Özellikler	Piroliz Sıcaklığı (°C)				Fuel Oil	
	425	475	525	575	No 3	No 4
Elemental Bileşim (Ağır. %'si)						
C	85,2	85	86	84,92		
H	9,31	9,33	9,10	9,34		
S	0,90	0,90	0,91	0,85	1,0 (en çok)	2,0 (en çok)
N	0,4	0,5	0,6	0,6		
O	4,09	4,17	3,29	4,21		
Kül (Ağır. %'si)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2 (en çok)	0,1 (en çok)
C/H	9,16	9,11	9,45	9,11	-	-
H/C Mol Oram	-	1,32	-	-	-	-
O/C Mol Oram	-	0,097	-	-	-	-
Molekül Formülü	-	CH _{1,32} O _{0,037} N _{0,005}	-	-	-	-
Yoğunluk (kg/m ³)	970	965	960	968	998 (en çok)	950 (en çok)
Viskozite (mm ² /s) 30 °C	5,00	4,89	4,80	4,85	40 (en çok) 100 °C'de	10 (en çok) 100 °C'de
Alevlenme Noktası, °C	30	32	33	33	66 (en az)	56 (en az)
Akma Noktası, °C	-4	-5	-5	-4,5	38 (en çok)	+ 10 yaz -1,1 kış (en çok)
pH	4,27	4,25	4,28	4,30	-	-
Üst Isıl Değeri (MJ/kg)	42,28	42,50	42,80	42,60	-	-



Şekil 2.22: 475 °C'de elde edilen piroliz yağı için kaynama eğrisi [57].

Çizelge 2.10: Piroliz sonucu elde edilen karbon siyahı ve çeşitli ticari karbon siyahları özelliklerinin karşılaştırılması [61].

Karbon Siyahı	Piroliz Sıcaklığı (°C)	Yüzey Alanı (m ² /g)	Yüzey Alanı Dağılımı (%)		
			Mikropor	Mezopor	Makropor
Piroliz Ürünü	500	67	0,03	82,90	17,07
	600	69	0,28	79,28	20,44
	700	79	0,01	85,20	14,79
	800	78	0,06	62,60	37,34
N 220	-	111	0,35	76,44	23,21
N 330	-	79	0,23	93,68	6,09
N 550	-	40	0,20	27,46	72,34
N 660	-	38	0,26	81,70	18,04

Çizelge 2.11: Piroliz gazı bileşimi ve üst ısı değeri [62].

Bileşim, (Hac. %'si)										Üst Isıl Değer (MJ/m ³)
CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₈ / C ₄ H ₆	30,3
26,2	5,1	21,5	17,3	8,2	8,7	3,9	3,4	0,7	5,0	

2.6 Kaynak Tarama Çalışması

Bu bölümde, atık lastik pirolizi, piroliz ürünleri, pirolize katalizör kullanımının etkisi, piroliz ürünlerinin kullanım seçenekleri ve piroliz tesisi için maliyet analizi başlıkları altında yapılmış kaynak tarama sonuçları özetlenmiştir.

Laresgoiti ve çalışma arkadaşları, atık taşıt lastikleri içerisindeki çelik şeritle birlikte keserek 2-3 cm genişliğinde yaklaşık 175 gramlık numuneler elde etmiş ve bunların 3,5 litrelik otoklavda 300-400-500-600-700 °C'de piroliz dönüşümünü incelemişlerdir. Yapılan çalışmalarda 500 °C sonrasında sıcaklığın sıvı ve gaz ürüne bir etkisinin olmadığı gözlenmiş, gaz ürün dönüşümünün yaklaşık % 17, sıvı ürünün ise, yaklaşık % 38'de olduğu belirtilmiştir. İnert gaz olarak azot kullanılmış ve 1 lt/dak hızında sürüklenmiş, ısıtma hızı olarak da 15 °C/dak seçilmiştir. Sonuç olarak katı miktarı en fazla 300 °C'de % 87,6 olarak, sıvı miktarı en fazla 700 °C'de % 38,5 olarak ve gaz miktarı en fazla 400 °C'de % 19,3 olarak bulunmuştur. Elde edilen piroliz yağının aromatik bileşiminin sıcaklıkla beraber arttığı ve 500 °C'deki piroliz yağının 150-360 °C arasındaki distilasyon fraksiyonunun İspanya'da ticari otomotiv motorinine çok benzediği görülmüştür [60].

Rofiqul ve çalışma grubu, motorsiklet lastiklerinin 375-575 °C arasındaki piroliz dönüşümünü sabit yataklı 0,661 litrelik bir reaktörde incelemişlerdir. Besleme olarak 2-12 cm³ hacminde, çelik kuşaktan arındırılmış fakat tekstil kuşağı alınmamış lastik parçaları kullanılmıştır. İnert atmosfer, azot gazı ile sağlanmış ve 5-10-20 saniyelik numune bekleme sürelerinde çalışılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda sıvı ürün dönüşümünün en çok 475 °C'de 4 cm³ hacmindeki numuneler ile 5 saniyelik bekleme süresinde gerçekleştiği görülmüştür. Katı ürünün dönüşümü 475-575 °C aralığında % 37'de sabit kalmış, numunenin boyutunun yükselmesiyle sıvı ürün dönüşümünün azalıp, katı ürün dönüşümünün arttığı, bekleme süresinin artmasıyla

sıvı ve katı ürün dönüşümünün azalıp, gaz ürün dönüşümünün arttığı belirtilmiştir. Elde edilen sıvı ürünün karakterizasyonu yapılmış, kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Bangladeş'te satılan ticari motorin ile karşılaştırılmıştır [63].

Rofiqul ve arkadaşları başka bir çalışmalarında ise, çelikten ayrıştırılmış ağır binek otomobili atık lastiklerinin pirolizini sabit yataklı 0,661 litrelik bir reaktörde gerçekleştirmiş ve piroliz yağının limonen içeriğini incelemiştir. Piroliz yağının en yüksek olduğu koşul 475 °C'de 4 cm³ hacmindeki numunelerde, 8 lt/dak azot gazı sürüklenme hızında ve 15 °C/dak ısıtma hızında bulunmuş olup, ağırlıkça % 55'tir. Bu koşullarda char miktarı % 36 ve gaz miktarı da % 9 olarak bulunmuştur. Piroliz yağının karakterizasyonu yapılmış, içerisindeki limonen miktarının ağırlıkça % 50,9 olduğu belirtilmiştir. Limonen miktarının bu denli yüksek olmasının nedeni olarak da ağır binek otomobillerinde kullanılan doğal kauçuğun çok yüksek olması gösterilmiş ve doğal kauçuğun piroliz sırasında limonene dönüştüğü söylenmiştir. Limonen miktarının da 475 °C'den sonra hızlı bir şekilde düştüğü belirtilmiştir [57].

Atık lastiklerle ilgili bir başka çalışma da Gönüllü ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. Deneyler laboratuvar ölçekli kesikli bir reaktörde yapılmış olup, besleme olarak 4 cm²'lik atık lastik numuneleri kullanılmıştır. İstenmeyen reaksiyonların önüne geçmek için reaktör sıcaklığı 160 °C olduğunda 100 ml/dak debide azot gazı beslenmiştir. 5-59 °C/dak ısıtma hızlarında 600 °C'ye kadar ısıtma yapılmış, en yüksek sıvı ürün dönüşümü 5,7 °C/dak ısıtma hızında 600 °C'de elde edilmiştir. Isıl bozunmanın 150 °C gibi erken sıcaklıklarda başladığı ve 550 °C'den sonra hemen hemen bittiği, ısıtma hızının artırılmasıyla da gaz ürün miktarının arttırılabileceği belirtilmiştir [65].

Shah ve çalışma grubu ise, piroliz sonucu oluşan karbon siyahının kullanılabilirliğini araştırmış, 5-10 mm genişliğe sahip 10 gramlık binek otomobil lastik parçalarının pirolizini 280-500 °C arasında 2 saat boyunca atmosferik basınçta kesikli bir reaktörde gerçekleştirmiştir. Reaktörde bulunan ilk gaz atmosferi olarak hava seçilmiş, fakat ısıl bozunmayla oluşan gaz ürün havanın yerini almıştır. Sıvı ürün dönüşümü 450 °C'de % 47 ile en yüksek değerine ulaşmış, bu sıcaklıkta katı ürün dönüşümü % 34 olarak elde edilmiştir. Elde edilen karbon siyahının yüzey alanları ölçülmüş ve piyasada ticari olarak bulunan karbon siyahları ile karşılaştırılmıştır. Yüksek mineral içeriği nedeniyle 1 N HCl ve H₂SO₄ ile 24 saat boyunca muamele edilmiş, yüzey alanlarında % 1000 oranında bir artış gerçekleşmiş, sonuçta 900 m²/g

civarında yüzey alanına sahip karbon siyahı elde edilmiştir. Daha sonra 900 °C’de aktivasyona tabi tutulmuş yüzey alanları 900 m²/gr’dan daha yüksek aktif karbon elde edilmiş, aktif karbon için adsorbsiyon testlerinin uygun bir adsorbent oldukları belirtilmiştir [66].

Unapumnuk ve arkadaşları ise, piroliz koşullarının piroliz yağının içerisindeki kükürtün giderilmesindeki etkisine yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. İçerisindeki çelikten ayrıştırılmış, 1-2 mm arasındaki boyutlara sahip, 3-4 gramlık lastik numuneleri, 1, 5, 10 °C/dk ısıtma hızlarında laboratuvar ölçeğinde bir reaktörde pirolize tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar neticesinde, kükürt gideriminin genel olarak ısıtma hızından etkilenmediği, 350-400 °C arasında sıcaklıkla beraber kükürt gideriminin de arttığı, 400 °C’den daha yüksek sıcaklıklarda sabit kaldığı ve lastik içerisindeki kükürtün katı, sıvı ve gaz ürün bileşimine geçtiği, 350-800 °C arasında, kükürtün sıvı üründen daha çok char içerisinde kaldığı gözlemlenmiştir. Kükürt gideriminin en yüksek olduğu çalışma koşulu ise, 10 °C/dak ısıtma hızı ve 350 °C sıcaklık olarak bulunmuş, bu sıcaklıkta kükürt gideriminin % 64,3 olduğu belirtilmiştir [67].

Cao ve arkadaşları ise, lastik-biyokütle birlikte pirolizini (ko-piroliz) incelemiştir. Lastik tozu, partikül boyutu 165 µm altında olarak tedarik edilmiş, kereste endüstrisinden gelen talaş ise, ufalanarak partikül boyutu 198-350 µm arasına getirilmiş ve deneyler öncesinde 4-5 saat boyunca 105 °C’ de kurutulmuştur. Deneyler sabit yataklı bir reaktörde 3,5 saat boyunca 500 °C’de ve 20 °C/dak ısıtma hızında katalizörsüz veya SBA-15, MCM-41 veya HZSM-5 katalizörlerinin ve kükürt gideriminin yapılması için de ZnO etkisinde gerçekleştirilmiştir. Her bir katalizör ve numune 100 g olarak reaktöre konulmuş, çeşitli oranlarda lastik ve talaş beraber pirolize tabi tutulmuştur. SBA-15 katalizörünün yağın viskozite ve yoğunluğunu belirgin bir biçimde düşürdüğü, bunun nedeninin SBA-15 katalizörünün yüksek porozitesi nedeniyle uzun zincirli moleküllerin katalizörün aktif yüzeylerine girebilmesi ve kısa zincirli moleküllere dönüşebilmesi olarak açıklanmıştır. Kullanılan ZnO nedeniyle, kükürt miktarının analiz cihazının sınır değerlerinin de altına düştüğü ve dolayısıyla piroliz yağında kükürte rastlanmadığı belirtilmiştir. Talaş ve lastik arasında hidrojen transferinin gerçekleştiği, ayrıca lastik pirolizi sonucu oluşan sıvı üründe yüksek miktarda olan PAH bileşiklerinin talaş

pirolizi sonucu oluşan oksijen içerikli radikaller nedeniyle ciddi oranda düştüğü sonucuna varılmıştır [40].

Piroliz yağının içerisindeki kimyasalların kullanılabilirliğine yönelik başka bir çalışma ise, Roy ve çalışma grubu tarafından gerçekleştirilmiştir. Pakdel, Pantea ve Roy; kullanılmış araba ve kamyon lastiklerinin, büyük ölçekli sürekli beslemeli 3 m uzunluğunda 60 cm çapında silindirik şekilli yarı kesikli bir reaktörde, vakum altında gerçekleştirilen pirolizi ile *dl*-limonen üretimini incelemişlerdir. 440°C ile 570°C arasında değişen farklı piroliz sıcaklıklarında yürütülen çalışmalar sonucunda optimum çalışma koşulları belirlenmiştir. Kauçuğun düşük basınç altında gerçekleşen ısıl bozunma ana ürünü olan *dl*-limonen açısından zengin bir fraksiyon elde edebilmek için piroliz yağlarının distile edildiği belirtilmiştir. Saf *dl*-limonen elde etmedeki zorluklardan ve limonen fraksiyonunda bulunan başlıca safsızlıklardan bahsedilmiştir. Yüksek piroliz sıcaklıklarında (>500°C) piroliz yağının krakingi nedeniyle *dl*-limonen veriminin düştüğü belirlenmiştir. Kraking ile meydana gelen bazı ikincil organik bileşikler analiz edilerek bu bileşiklerin kaynama noktalarının *dl*-limonene yakın olduğu bulunmuştur. Çalışmada, *dl*-limonen dönüşümünün piroliz reaktör basıncının artmasıyla da düştüğü belirlenmiştir. Lastiklerin, *dl*-limonen oluşumuna yol açan ısıl degradasyon mekanizmasından bahsedilmiştir. Çalışmaların sonucunda, maksimum *dl*-limonen dönüşümünün ağırlıkça %3,6 oranında elde edilebildiği ve bu fraksiyondaki safsızlıkların ve sülfür içeren bileşiklerin gaz kromatografisi ile analiz edilerek bazı tiyofen türevlerinin de teşhis edildiği belirtilmiştir [68].

Li ve arkadaşları çalışmalarında, hurda lastiklerin sürekli bir sistemde 3 m uzunluğunda 0,3 m çapındaki döner fırınlı bir reaktörde, -20 ile -10 Pa arasında değişen negatif basınç altında, 450°C ile 650°C arasındaki farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen pilot ölçekli pirolizini incelemişlerdir. Atık lastiklerin pirolizinde, döner fırınlı reaktörün bozunumun tamamlanması için gereken katı bekleme süresinin esnek olarak ayarlanabilmesinden dolayı piroliz reaktörü yerine tercih edilebilecek bir alternatif olduğu vurgulanmıştır. Reaktör sıcaklığı arttıkça, karbon siyahı dönüşümünün ortalama değerinin ağırlıkça %39,8'de sabit kaldığı bulunmuştur. Yağ dönüşümünün ise, 500°C sıcaklıkta ağırlıkça %45,1 ile en yüksek değerine ulaştığı belirtilmiştir. Piroliz sonucu elde edilen yağların, yüksek ısıtma değerlerinden (40-42 MJ/kg), uygun viskozitelerinden (1,6-3,7 mm²/s) ve uygun

kükürt içeriklerinden (ağırlıkça %0,97-1,54) ötürü sıvı yakıtlar olarak kullanılabileceğinden bahsedilmiştir. Uçucu aromatik bileşiklerin nafta fraksiyonları kantitatif olarak analiz edilmiş ve benzen, toluen, ksilen, stiren ve limonenin yağdaki maksimum konsantrasyonları ağırlıkça sırasıyla %2,09, %7,24, %2,13 ve %5,44 olarak belirlenmiştir. Fluoren, fenantren ve antrasen gibi polisklik aromatik hidrokarbonların konsantrasyonlarının artan sıcaklıkla artış gösterdiği bulunmuştur. Piroliz sonucu elde edilen karbon siyahının BET (Brunauer-Emmett-Teller) yüzey alanı yaklaşık 89,1 m²/g olan mezoporlardan meydana geldiği belirtilmiştir. Karbondioksit aktivasyonundan sonra karbon siyahının yüksek bir yüzey alanı değerine sahip olduğu (306 m²/g) belirtilmiştir. Hem pirolitik karbon siyahının, hem de aktifleştirilen karbon siyahının, büyük moleküllü maddelerin adsorbantı olarak kullanılmaya uygun olduğundan bahsedilmiştir [69].

Atık lastik pirolizi ile elde edilen karbon siyahının değerlendirilmesine yönelik başka bir çalışma da Pozan ve çalışma grubu tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, lastiğin sırt kısmından alınan ufak parçalar kesilerek boyutu küçültülmüş, yıkanıp kurutularak piroliz için uygun hale getirilmiştir. Piroliz deneyleri 5,5 litrelik silindirik bir reaktörde gerçekleştirilmiş, inert ortam olarak azot kullanılmış, ısı bozundurma 600 °C’de 90 dakika bekletilerek sağlanmıştır. Elde edilen karbon siyahı inorganik bileşiklerinden ayrıştırılmak için % 10’luk HCl çözeltisi ile yıkanmış, yıkama işlemi süzöntüde Cl⁻ iyonları belirlenemeyinceye kadar devam etmiştir. Daha sonrasında örnekler sıcak damıtılmış su ile yıkanmış ve kurutulup aktifleştirme işlemine hazır hale getirilmiştir. Aktifleştirme işlemi CO₂ ile yapılmış, 900 °C’de aktifleştirilen numunenin yüzey alanı 280 m²/g olarak, 1000 °C’de aktifleştirilen numunenin ise, 513 m²/g bulunmuştur. 1000 °C’de elde edilen aktif karbonların fenol tutma özellikleri incelenmiş, 1 gramı ile 500 ppm gibi yüksek bir değere sahip fenol çözeltisinin % 93,33’ünü tutabildiği belirtilmiştir [70].

Piroliz yağının kimyasal hammadde deposu olarak değerlendirilebilme olanağının yanısıra, alternatif yakıt olarak özellikleri de araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Murugan ve ekibi, otomobil lastiklerinin çelik ve bez kuşaktan arındırılmış parçalar halinde pirolizini 2,85 litrelik sabit yataklı bir reaktörde gerçekleştirmiştir. Deneyler 450-650 °C aralığında, 5 °C/dak ısıtma hızında ve 2 saatlik bekleme sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Piroliz sonucu elde edilen üründe piroliz yağı % 55, gaz ürün % 10 ve karbon siyahı % 34 ve nem % 1 olarak bulunmuştur. Elde edilen piroliz

yağının kükürt içeriğinin azaltılması için % 8'lik H_2SO_4 çözeltisi ile karıştırılmış, 40 saat bekletildikten sonra oluşan 2 farklı fazdan üst faz alınıp vakum altında distilasyona tabi tutulmuştur. Distilasyon 150-200 °C arasında gerçekleştirilmiş ve elde edilen son ürünün bir dizel motorunda ham veya ticari dizelle harmanlanmış şekilde testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarında motorun ham numunede çalışmadığı fakat % 90 distile yağ ve % 10 motorin harmanında iyi bir şekilde çalışabileceğinden bahsedilmiştir [71].

Bazı araştırmacılar ise, atık lastik pirolizini çeşitli katalizörler altında denemiştir. Shah ve arkadaşları, atık lastiklerin kesikli reaktörde ve atmosferik basınç altında gerçekleştirilen katalitik pirolizinde, katı bazik katalizörlerin (magnezyum oksit ve kalsiyum karbonat) ve sıcaklığın piroliz ürünlerinin dönüşümüne ve bileşimine etkisi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada 300–400°C arasındaki farklı sıcaklıklarda, atık lastiklerin magnezyum oksit (MgO) ve kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) katalizörleri ile pirolizinden elde edilen ürün dönüşümleri ölçülmüş ve her iki katalizör için de en yüksek sıvı hidrokarbon dönüşümünü veren 350°C sıcaklık, lastik pirolizi için optimum sıcaklık olarak belirlenmiştir. Optimum sıcaklıkta (350°C), 2 saat süreyle gerçekleştirilen bu çalışmadan sonra, MgO ve $CaCO_3$ ile gerçekleştirilen katalitik pirolizler sonucunda atık lastikler sıvı hidrokarbonlara dönüştürülmüş ve piroliz ürünlerinin gaz, sıvı ve katı oranları sırasıyla ağırlıkça % 24,4:39,8:35,8 ve % 32,5:32,3:35,2 olarak elde edilmiştir. Piroliz ürünlerinin fiziksel ve kimyasal karakterizasyonu yapılmıştır. Her iki katalizörle de ağırlıkça % 25 alifatik hidrokarbon üretildiği; ancak kalsiyum karbonat katalizörüyle elde edilen %50 aromatik, %25 polar hidrokarbon içeren piroliz ürününe göre, magnezyum oksitle elde edilen piroliz ürününde, aromatik hidrokarbon oranının daha yüksek (%55) olduğu ve polar hidrokarbon oranının ise, daha düşük (%20) olduğu görülmüştür. Piroliz ürünlerinin distilasyon verilerinin ve yakıt testi sonuçlarının, her iki katalistin de yağ fraksiyonlarının ticari dizel yakıt ürünlerinin güncel standartlarını sağlamakta olduğunu gösterdiğinden bahsedilmiştir [72].

Boxiong ve arkadaşları, atık lastiklerin ilk aşamada sabit yataklı reaktörde piroliz işlemine tabi tutulduğu, ikinci aşamada ise, meydana gelen piroliz gazlarının, USY ve ZSM-5 zeolit katalizörleriyle doldurulmuş katalitik reaktörden geçirildiği iki-kademeli bir yataklı reaktörde pirolizini gerçekleştirmiştir. Atık lastiklerin katalizörle yapılan piroliz işleminde, farklı katalizör sıcaklıklarının elde edilen ürün

dönüşümüne etkisi incelenmiş ve artan katalizör sıcaklığıyla sıvı dönüşümü azalırken gaz dönüşümünün arttığı belirlenmiştir. Her iki katalizörle elde edilen piroliz yağının distilasyonu ile elde edilen kaynama noktası düşük ($<220^{\circ}\text{C}$) ürünlerin analizi sonucunda, tek halkalı aromatik bileşiklerin konsantrasyonunda, katalizörsüz piroliz ürününe göre önemli derecede artış olduğu belirlenmiştir. Örneğin; USY katalizörünün kullanıldığı, 500°C piroliz sıcaklığında, 400°C katalizör sıcaklığında ve 0,5 katalizör/lastik oranında gerçekleştirilen reaksiyon sonucunda, kaynama noktası düşük ürünlerin fraksiyonunda (% 71) toluen yüzdesi ağırlıkça %11,62 değerine ulaşırken, benzen %1,6, *m/p*-ksilen %12,27 ve *o*-ksilen ise, %4,42 oranlarında elde edilmiştir. Elde edilen yağdaki aromatik hidrokarbonların dönüşümünün, seçiciliği etkileyen por büyüklüğü ve katalizör yüzeyindeki aktif bölge sayısını etkileyen silisyum/alüminyum oranı gibi iki farklı katalizör özelliklerine bağlı olduğu belirlenmiştir [73].

Williams ve arkadaşları ise, çalışmalarında, kullanılmış lastiklerin iki kademeli katalitik pirolizi sonucu elde edilen yağın kalitesinin artırılması ile, sıvı yakıt yerine kimyasal hammadde olarak kullanılmaya uygun nitelikte yüksek oranda aromatik yağın üretiminden bahsetmiştir. Lastikler öncelikle sabit yataklı reaktörde piroliz işlemine tabi tutulmuş, daha sonra meydana gelen piroliz gazları, zeolit katalizörü ile dolu ikincil bir sabit yataklı reaktörden geçirilmiştir. Piroliz reaktörünün sıcaklığı 500°C sıcaklıkta sabit tutularak 430°C ve 600°C arasında farklı katalizör sıcaklıklarının, elde edilen yağların dönüşümü ve içeriği üzerine etkisi belirlenmiştir. Kullanılmış lastiklerin pirolizi, belirlenen katalizör sıcaklığında 2 saat boyunca, sabit katalizör / lastik oranında (1:1) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, farklı por büyüklüklerine ve yüzey aktivitelerine sahip daha yüksek asitlikteki Y-tipi zeolit katalizörü (Silisyum/Alüminyum oranı 5,4) ve düşük asitlikteki zeolit ZSM-5 katalizörü (Silisyum/Alüminyum oranı 40) olmak üzere iki zeolit katalizörünün de etkisi incelenmiştir. Katalizörün etkisi, gaz dönüşümündeki artış ve katalizörde kok oluşumuna neden olan yağın dönüşümünün azalması olarak belirlenmiştir. Yağda bulunan tek halkalı aromatik hidrokarbonların, benzen, toluen ve ksilenlerin, katalizör varlığında fark edilir derecede artış gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, naftalin ve alkilleşmiş naftalinlerin de analiz edildiği ve katalizör varlığında benzer şekilde fark edilir bir artış gösterdiği belirtilmiştir. Daha büyük por büyüklüğüne ve daha yüksek yüzey aktivitesine sahip Y-tipi zeolit katalizörünün, ZSM-5 katalizörü

ile karşılaştırıldığında daha yüksek konsantrasyonlarda aromatik bileşik ürettiği belirtilmiştir. Katalizör sıcaklığını arttırmanın, benzen, toluen, ksilenler, naftalin ve alkile naftalinlerin konsantrasyonunda önemli değişikliklere yol açtığı; ancak bu değişikliklerin iki katalizör için farklı yönlerde olduğu belirlenmiştir [74].

Roy ve grubu başka bir çalışmalarında ise, vakum altında gerçekleştirilen yıllık 36 bin ton atık lastik işleme kapasitesine sahip atık lastik piroliz tesisi için maliyet analizini incelemiştir. Tesisin öncelikle, boyut küçültme, piroliz, kükürt giderimi ve buhar eldesi ünitelerine sahip olacağı, 3. yıldan sonra karbon siyahı demineralizasyon ünitesinin de ekleneceği koşullarda analiz gerçekleştirilmiştir. Bu koşullarda, piroliz ekipmanları için 5,6 milyon Avro, kükürt giderimi ünitesi için 0,5 milyon Avro, buhar eldesi ünitesi için 1 milyon Avro, çelik ayrıştırma, boyut küçültme ve ürün saklama ünitesi için 1,6 milyon Avro, karbon siyahı ezme ve demineralizasyon ünitesi için 1,2 milyon Avro ve inşaat için 1,6 milyon Avro olmak üzere toplam yatırım değerinin 11,5 milyon Avro olduğu söylenmiştir. Yıllık işletme giderlerinin amortisman miktarı dahil olmak üzere ton lastik başına 120 Avro olduğu belirtilmiştir. Proses genelinde ise ton lastik başına 55 Avro (yıllık 2 milyon Avro) net gelire sahip olacağı öngörülmüştür. Tesis kurulumu sırasında, ton lastik başına 35 Avro'dan başlayarak bir sonraki yıl azalmak koşulu ile ilk 5 yıl boyunca mali destek alınmasının tesise önemli bir katkı yapacağından bahsedilmiştir [75].

3. YAPILABİLİRLİK ÇALIŞMASI

Bu bölümde aşağıda sıralanan başlıklar altında yürütülen yapılabirlik çalışması sunulmaktadır:

- Atık lastik pirolizi için model tesis tasarımı
- Atık lastik pirolizi model tesisi için maliyet analizi

3.1 Atık Lastik Pirolizi İçin Model Tesis Tasarımı

Çeşitli ülkelerde faaliyet gösteren atık lastik piroliz tesisleri ve literatür araştırmaları sonucunda atık lastik pirolizini endüstriyel boyutta gerçekleştirebilecek sürekli bir tesis için seçilen blok şema ve proses akım şeması ilerleyen bölümlerde (Bkz: Bölüm 3.1.1 Tesis blok şeması ve Bölüm 3.1.2 Tesis proses akım şeması) verilmiştir. Tesis tasarımı, faaliyette bulunan piroliz tesisleri ve çeşitli akademik araştırmalar referans alınarak, toplanan atık lastikleri doğrudan son ürünlere dönüştürebilecek şekilde çeşitli saptamalar, kabuller ve seçimler ile gerçekleştirilmiş olup, bunlar aşağıda verilmiştir:

- Piroliz sonrasında elde edilen karbon siyahı, piroliz yağı ve hurda çelik herhangi bir ek iyileştirme işlemine tabi tutulmadan satışa sunulacak, gaz ürün ise herhangi bir iyileştirmeye tabi tutulmadan ateşlemeli ısıtıcıda yakılacak fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir.
- Çelik ayrıştırma ünitesinde çeliğin % 95'i, manyetik ayırıcılar ile de geri kalan çeliğin tamamı ayrıştırılmaktadır.
- Piroliz sonucunda oluşan sıvı ürün içerisindeki bileşen sayısı oldukça fazladır ve bazı koşullarda yüzden daha fazla olabilmektedir. ChemCAD® ve SIMSCI PROII® programları ile yapılan bazı hesaplamalarda kolaylık sağlaması açısından, piroliz yağında kütlege en çok bulunan 10 bileşen literatür araştırmaları sonucunda belirlenmiş ve Çizelge 3.1'de verilmiştir. Gaz ürün bileşimi Çizelge 2.11'de verildiği gibidir.
- Simülasyon programı yatışkın hal durumunda çalıştırılmıştır.

- Ateşlemeli ısıtıcıda tam yanma gerçekleşmiştir.
- Borulardaki ve diğer proses ekipmanlarındaki basınç düşüşleri ihmal edilmiştir.
- Proses akım şemasında, piroliz sonucu elde edilen karbon siyahının son ürüne dönüştürülmesi ve çelik karışımının ayrıştırılması verilmemiştir. Fakat, ekonomik analize bu süreçlerin maliyetleri eklenmiştir.
- Proses akım şemasında kontrol ediciler ve çalışma şekilleri gösterilmemiştir. Fakat, ekonomik analize bu ekipmanların maliyetleri eklenmiştir.
- Yoğunlaştırıcılar için gerekli olan soğutma yükü su ile gerçekleşmektedir. Isınan soğutma suyunun tekrar soğutulması soğutma kuleleri ile gerçekleşmektedir. Soğutma kuleleri proses akım şemasında gösterilmemiştir. Fakat, ekonomik analize bu cihazların maliyetleri eklenmiştir.
- Tesis sürekli çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Tesisin yıllık 20 000 ton atık lastiği işleyebileceği, yıllık 300 gün, günde 16 saat çift vardiya olarak çalışacağı koşullarda tasarım gerçekleştirilmiştir.
- Piroliz sonucu, elde edilen ürünler:
 - 45 kg piroliz yağı/100 kg atık lastik
 - 36 kg karbon siyahı/100 kg atık lastik
 - 11 kg çelik/100 kg atık lastik ve
 - 8 kg gaz ürün/100 kg atık lastik şeklindedir.

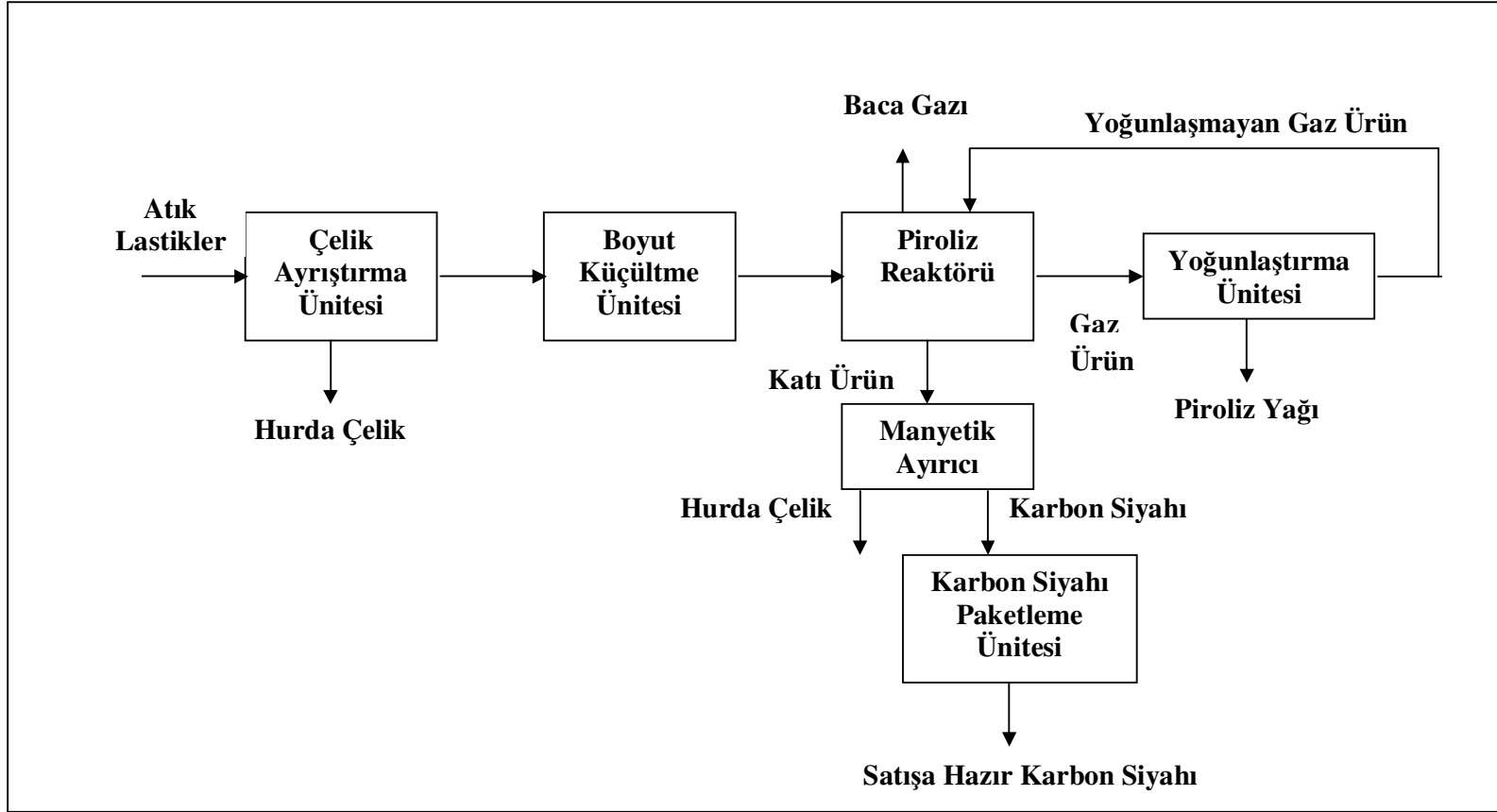
Çizelge 3.1: Hesaplamalar için belirlenen piroliz yağı bileşimi [57,60,62,63].

Bileşen Adı	Miktar (Ağır. %'si)
Limonen	25
Toluen	12
Benzen	10
Ksilen	8
Stiren	7
Etilbenzen	4
Dimetilsiklohekzen	3
1-etil-3-metilbenzen	3
Heptadekan	18
Trimetilnaftalen	10

3.1.1 Tesis blok şeması

Önerilen model tesisin blok şeması Şekil 3.1’de verilmiştir. Önerilen tesiste piyasadan toplanan atık lastikler, öncelikle içerisindeki çelik şeritten ayrıştırılmak için bir bütün halinde konveyörler ile çelik ayrıştırma ünitesine gönderilir. Bu süreç, çeşitli parçalayıcılar ve manyetik ayırıcılar ile gerçekleştirilir ve çeliğin % 95’i bu süreçte ayrıştırılır. Geriye kalan çelik ise piroliz sonucu oluşan katı üründen manyetik ayırıcılar ile ayrıştırılır [76]. Çeliğin ayrıştırılması işlemi bazı tesislerde piroliz işleminden sonra gerçekleştirilmektedir. Bu süreçte bütün lastikler tanecik boyutları küçültülerek ya da bütün haliyle piroliz işlemine tabi tutulur ve çelik piroliz sonucu ortaya çıkan karbon siyahından manyetik ayırıcılar ve elek ile ayrıştırılır. Fakat bu süreçte, lastik boyutu yeteri kadar küçültülemediğinden piroliz sırasında gerçekleşen ısı ve kütle transferinde kayıplar gerçekleşebilmekte ve piroliz veriminde düşüş meydana gelmektedir. Ayrıca reaktör seçimini etkilediğinden, vidalı reaktörlerin lastik pirolizi için daha verimli olmasından yola çıkılarak, tesis çelik şerit ayrıştırmasının reaktörden önce yapılacak şekilde tasarlanmıştır [57,77].

İçerisindeki çelik şeritten ayrıştırılan lastikler, çeşitli kesiciler ile boyut küçültme işlemine tabi tutulmaktadır. Buradaki amaç, piroliz reaktöründe ısı ve kütle transferinin daha etkin bir biçimde gerçekleşmesini sağlamaktır. Boyut küçültme işleminde çeşitli kesiciler ve öğütücüler kullanılmaktadır [76]. Bu işlem ile tanecik



Şekil 3.1: Atık lastik pirolizi model tesisi blok şeması [41,57,75,76].

boyutu mikron seviyesinden birkaç santimetreye kadar değişebilen lastikler elde edilir. Tanecik boyutu küçüldükçe bu işlem için harcanan enerji miktarında artış olmaktadır. Yanısıra, tanecik boyutu küçültülmüş lastikler için piroliz işlemi daha verimli halde gerçekleşmektedir [57].

İçerisindeki çelik şeritten ayrıştırılmış ve tanecik boyutu küçültülmüş lastikler yikanıp kurutularak piroliz işlemine hazır hale getirilir. Daha sonra konveyörler ile piroliz reaktörüne beslenir. Reaktör yatay ve eğimli olacak şekilde tasarlanmış ve teknik detayları ve çalışma koşulları “3.1.2 Tesis proses akım şeması” başlığı altında verilmiştir. Teknik detayları ve çalışma koşullarını belirlemek için yapılan seçimler aktif olarak faaliyette bulunan tesisler ve akademik çalışmalar göz önünde bulundurularak yapılmıştır.

Piroliz reaktöründe gerçekleşen ısıl bozunma sonrasında daha önce de bahsedildiği gibi katı ve gaz ürün ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan katı ürün reaktörden alındıktan sonra soğutulur. Manyetik ayırıcılar ile içerisinde kalan küçük miktardaki çelikten de arındırılır. Daha sonra granül haline getirilmek amacıyla istenilen boyutlara ulaşmaya kadar ezilir. Bu işlem sırasında ortaya çıkan küçük partiküller tutularak çevreci bir ortam oluşturulur. Ezilen karbon siyahı pelet haline getirilir. Peletler sıcak hava ile kurulanır, tekrar soğutulur ve paketlenerek satışa hazır hale getirilir. Ayrıştırılan çelik de satışa sunulmak üzere daha önceden ayrıştırılan çelikle beraber depolanır [76].

Piroliz sonucu oluşan gaz ürün ise yoğunlaştırma ünitesine gönderilir. Su soğutmalı 2 kademeli yoğunlaştırıcı ile sıvı ürün ve gaz ürün elde edilir. Elde edilen piroliz yağı depolama tanklarına gönderilerek satışa hazır halde bekletilir. Gaz ürün ise, reaktörü ısıtmakta kullanılacağından, kompresör ile basıncı artırılarak ateşlemeli ısıtıcıda yakılır ve piroliz reaktörünün dışını saran ısıtma ceketinde dolaşan eriyik tuzu ısıtır ve böylece piroliz reaktörünün ısıtılması sağlanır [42,76].

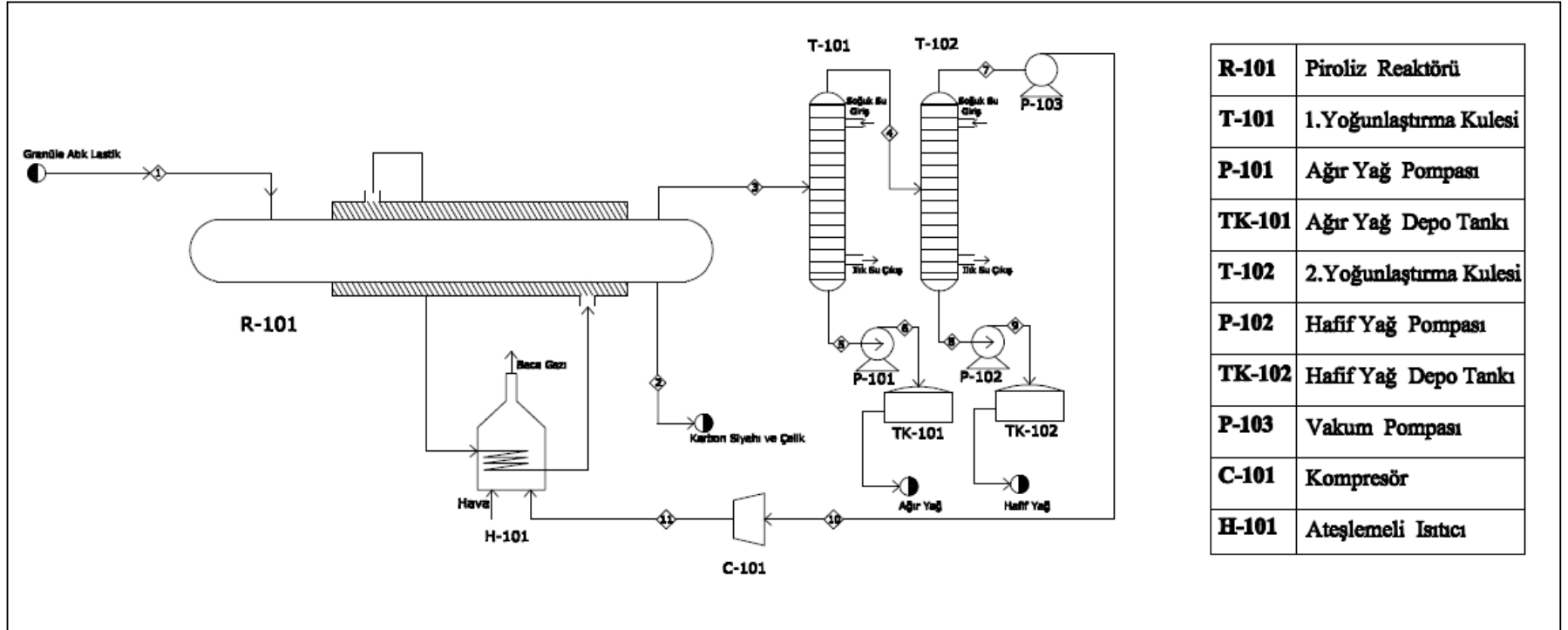
3.1.2 Tesis proses akım şeması

Şekil 3.2’de tesis için proses akım şeması, lastiklerin pirolize hazır hale getirilmesi işleminden sonraki kademeler için verilmiştir. Bu kademelere, karbon siyahı son ürün elde etme ünitesi dahil edilmemiştir. Çizelge 3.2’de reaktör için çalışma koşulları ve malzeme özellikleri, verilmiştir. Ekipman tablosu, proses için akım tablosu, servis akımları tablosu ve elektrik tüketimi ise ChemCAD® ve SIMSCI

PROII® programlarında yapılan simülasyonlar sonucunda belirlenmiştir. Ek A1 ve EK A2’de bu simülasyon programlarının sonuçları, EK A3’te ise Ekipman tablosu, proses için akım tablosu, servis akımları tablosu ve elektrik tüketimi verilmiştir.

Çizelge 3.2: Piroliz reaktörü çalışma koşulları ve malzeme bilgileri [75,76,79].

Çalışma Koşulları	
Sıcaklık (°C)	500
Isıtma Hızı (°C/dak)	10
Kapasite (ton granüle atık lastik/h)	3731,5
Malzeme	
Malzeme	SS 316
Dış Kısım	Isıtma Ceketli
Boyut	
Uzunluk (m)	15
Çap (m)	2,5
Konum	Yatay



Şekil 3.2: Atık lastik pirolizi model tesisi için proses akım şeması [41,57,75,76]

3.2 Atık Lastik Pirolizi Model Tesisi İçin Maliyet Analizi

Atık lastik piroliz tesisi için maliyet hesaplaması, Bölüm 3.1’de “Atık Lastik Pirolizi İçin Model Tesis Tasarımı” başlığı altında verilen ayrıntılı teknik bilgiler ışığında, firmalardan alınan fiyat teklifleri doğrultusunda CAPCOST® programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. CAPCOST® programı çıktıları 4 nolu “Sonuçlar ve Tartışma” başlığı altında verilmiştir. Maliyet analizi yapılırken kullanılan çeşitli saptamalar, kabuller ve seçimler aşağıda verilmiştir:

- Hesaplamalar Türkiye koşulları için gerçekleştirilmiştir.
- Ortaya çıkan karbon siyahı, hurda çelik ve piroliz yağının hepsi satılmaktadır.
- Piroliz yağı, karbon siyahı ve hurda çelik fiyatları Türkiye’de faaliyet gösteren bir atık lastik piroliz tesisinin satış fiyatlarıdır.
- Tesisin kurulumu için gerekli alan 10 000 m²’dir.
- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından çıkartılan ve 26 Kasım 2006 Cumartesi günü 26357 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan “Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği”ne göre, LASDER atık lastikleri bertaraf eden kuruluşlara vermekle yükümlü olduğundan atık lastikler için herhangi bir ücret talep etmemekle yükümlüdür. Fakat gerçekleştirilen görüşmede, atık lastiklerin kullanımı için taleplerin arttığı ve bu yüzden yakın zamanda ton başında 20 TL civarında bir ücretin atık lastik pazarını belirleyeceği söylenmiştir [24]. Atık lastikler için nakliye giderleri de gözönünde bulundurulmuş ve atık lastikler için ton başına nakliye ücreti dahil olarak hesaplamalar yapılmıştır.
- Elektrik fiyatına, vergiler ve diğer ek ücretler dahil edilmiştir.
- Tesis kurulum süresi 1 yıldır.
- Ekonomik analiz 10 yıllık süreç üzerinden değerlendirilmiştir.
- Gelir vergisi oranı % 35, banka yıllık faiz oranı % 8’dir.
- Amortisman giderleri hesaplaması için sabit amortisman yöntemi kullanılmış ve amortisman ödemesi proje ömrüncü devam edecek koşullarda hesaplamalar yapılmıştır.
- Gerekli işçi sayısı vardiya başına 10 kişidir. Çift vardiya çalışılacağından gerekli işçi sayısı atık lastik pirolizi tesisi için 20 kişidir.

Çizelge 3.3'te proses ekipmanları fiyatları ve Çizelge 3.4'te proses girdi ve çıktı fiyatları Türk Lirası (TL), ABD Doları (\$) ve Avro (€) cinsinden verilmiştir. Döviz kurları Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası'nın Kasım 2009 ortalama fiyatlarına göre verilmiş ve Kasım 2009 ortalama kuruna göre 1 ABD Doları 1,49 TL ve 1 Avro 2,23 TL olarak alınmıştır. Fiyatlar, piyasada birden fazla firmayla gerçekleştirilen görüşmeler sonucunda alınmış, ortalama fiyat yazılmıştır.

Çizelge 3.3: Proses ekipmanları fiyatları [80,81].

Ekipman Adı	Ekipman Fiyatı		
	TL	ABD Doları	Avro
Reaktör	596 000	400 000	267 265
Ateşlemeli Isıtıcı	74 500	50 000	33 408
Yoğunlaştırma Kuleleri	178 800	120 000	80 180
Depolama Tankları	223 500	150 000	100 224
Vakum Pompası	6021	4041	2700
Santrifüj Pompalar	1300	872,5	583
Kompresör	13380	8980	6000
Soğutma Kulesi	44 600	29 933	20 000
Analiz Cihazları, Otomasyon, PLC yazılımı ve Yangın Güvenlik Sistemi	1 561 000	1 047 651	700 000
Boru ve Bağlantıları	22 300	14 966	10 000
Çelik Ayrıştırma ve Depolama Ünitesi	1 338 000	897 987	600 000
Karbon Siyahı Son Ürün Eldesi ve Depolama Ünitesi	669 000	448 993	300 000

Çizelge 3.4: Birim başına proses girdi ve çıktı fiyatları [80,81].

Girdi / Çıktı Adı	Birim	Fiyatı		
		TL	ABD Doları	Avro
Atık Lastik	Ton	58	38,9	26
Elektrik	kWh	0,255	0,1712	0,1144
Karbon Siyahı	Ton	1000	671,14	448,43
Piroliz Yağı	Ton	650	436,24	291,5
Hurda Çelik	Ton	320	214,8	143,5

Tesisin karlılığını hesaplamak için kullanılan formüller ve kısaltmalar aşağıda verilmiştir [82]:

$$C_{TM} = 1,18 \sum C_{BM} \quad (3.1)$$

$$C_{GR} = C_{TM} + 0,50 \sum C_{BM}^0 \quad (3.2)$$

$$FCI_L = C_{GR} \quad (3.3)$$

$$COM_D = 0,18 * FCI_L + 2,76 * C_{OL} + 1,2(C_{UT} + C_{WT} + C_{RM}) \quad (3.4)$$

$$C_W = 0,1 * C_{RM} + 0,1 * FCI_L + 0,1 * C_{OL} \quad (3.5)$$

$$d_k^{SL} = (FCI_L - S) / n \quad (3.6)$$

$$S = 0,1 * FCI_L \quad (3.7)$$

$$R_Y = (R - COM_D - d_k^{SL}) * (1 - t) + d_k^{SL} \quad (3.8)$$

$$C_{TI} = FCI_L + C_W \quad (3.9)$$

$$PBP = \sum R_Y / FCI_L \quad (3.10)$$

$$F_2 / F_1 = (C_2 / C_1)^i \quad (3.11)$$

C_{TM} : Toplam modül maliyeti

C_{BM} : Ekipmanlar için doğrudan veya dolaylı maliyet

C_{GR} : Temel maliyetler toplamı

C_{BM}^0 : Temel koşullarda çalışam ekipmanlar için doğrudan veya dolaylı maliyet

C_{OL} : İşçilik giderleri

FCI_L : Toplam sabit yatırım maliyeti
 COM_D : İşletme maliyeti
 C_{UT} : Servis akımları maliyeti
 C_{WT} : Atık bertaraf maliyeti
 C_{RM} : Hammadde maliyeti
 C_W : İş sermayesi
 d_k^{SL} : Amortisman giderleri
 S : Proje sonlandırıldıktan sonra ekipmanların hurda değeri
 n : Amortisman süresi
 R_Y : Yıllık net hasıla
 R : Satış hasılatı
 t : Gelir vergisi oranı
 C_{TI} : Toplam yatırım miktarı

 PBP : Projenin toplam yatırım maliyetini karşılaması için geçen kendini geri ödeme süresi

 CCP : Proje sonunda elde edilen toplam kazanç

 F_2 : 2. durum için fiyat
 F_1 : 1. durum için fiyat
 C_2 : 2. durum için kapasite
 C_1 : 1. durum için kapasite
 i : Kapasite katsayısı, bu çalışmada 0,8 olarak alınmıştır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, atık lastik pirolizi model tesisi yapılabilirlik çalışması sonuçları aşağıda sıralanan başlıklar altında sunulmuştur:

- Atık lastik pirolizi model tesisi tasarımı sonuçlarının değerlendirilmesi
- Doğrudan maliyet analizi ve CAPCOST® programı ile elde edilen sonuçların değerlendirilmesi
- Şimdiki değer yöntemine göre maliyet analizi ve CAPCOST® programı ile elde edilen sonuçların değerlendirilmesi
- Karlılığın değişen ürün fiyatlarına göre değerlendirilmesi

4.1 Atık Lastik Pirolizi Model Tesisi Tasarımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Atık lastik pirolizi model tesisinin tasarımı ve tasarımına ilişkin detaylı sonuçları Bölüm 3.1’de “Atık Lastik Pirolizi Model Tesisi” başlığı altında verilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, yıllık 20 bin ton atık lastik pirolizi gerçekleştiren model tesis ile 9000 bin ton piroliz yağı, 7200 ton karbon siyahı, 2200 ton hurda çelik ve 1600 ton piroliz gazı elde edildiği belirlenmiştir. Piroliz yağı, çift kademeli yoğunlaştırma kuleleri ile elde edilmiş ve içeriğinde limonen başta olmak üzere yüksek miktarda aromatik bileşiklerin olduğu varsayılmıştır. Piroliz gazı ise yüksek ısı değeri ile ateşlemeli ısıtıcıda yakılarak piroliz reaktörünü ısıtmaktadır. Karbon siyahının ek saflaştırma işlemlerine tabi tutulmadan, hurda çelik gibi doğrudan satışa sunulacak özellikte olduğu varsayılmıştır. Sistemde yapılabilecek iyileştirmeler ise 5.2 başlığı altında “Atık Lastik Pirolizi Model Tesisi İçin Öneriler” kapsamında verilmiştir.

4.2 Doğrudan Maliyet Analizi ve CAPCOST® Programı ile Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu analiz yöntemi tesisin karlılığını, yıllık net hasılanın, yıllar boyunca toplam yatırım miktarına eklenmesi ile elde edilir.

Hesaplamalar için 3.1-3.10 denklemleri CAPCOST® programında kullanılmış ve elde edilen tesis için ekonomik girdi ve çıktı bilgileri, Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelge 4.1’den de görüleceği üzere, tesis için toplam maliyet yaklaşık olarak 8,9 milyon TL iken işletme giderleri yıllık yaklaşık olarak 5 milyon TL’dir. Atık lastiklerin toplam tesise getirilmesinin maliyeti yıllık 1,2 milyon TL civarında iken, elektrik giderleri yaklaşık 500 bin TL’dir. İşçilik maliyeti ise yıllık 500 bin TL’den biraz fazladır. Ödenecek amortisman giderleri ve proje sonlandırılışı sonrası ekipmanların hurda fiyatı ise 700 bin TL’den fazladır. Tüm bu giderlere karşılık, ürünlerin satış hasılatından elde edilen ciro yıllık 13,7 milyon TL’den fazla iken, net kar ise yaklaşık olarak 5,8 milyon TL’dir. 10 yıl sonunda, projeden elde edilen toplam kazanç ise yaklaşık 53 milyon TL’dir. Proje için PBP değeri 1,3 yıldır. Bu sonuçlar doğrultusunda, tesisin oldukça karlı bir tesis olduğu ve 1,3 yıl gibi çok kısa bir sürede geri ödemenin gerçekleştiği görülmektedir.

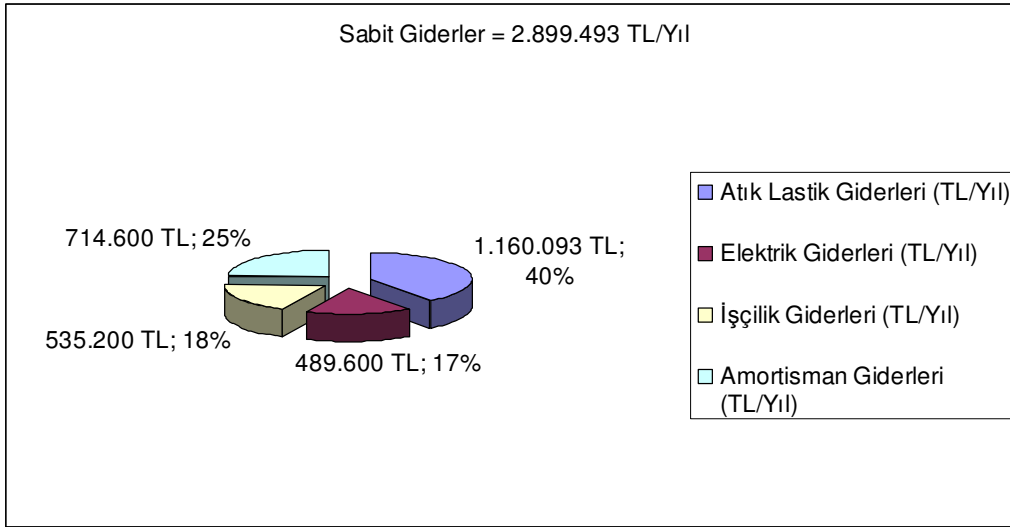
Şekil 4.1’de ise, tesis için sabit giderler ve oranları gösterilmiştir. Sabit giderler kısmında hammadde, elektrik, işçilik ve amortisman giderleri yıllık olarak verilmiştir. Şekilden de anlaşılabileceği üzere en fazla giderleri % 40’lık kısım ile hammadde oluşturmaktadır. Bunun dışında amortisman giderleri de önemli bir miktar tutmaktadır. İşçilik ve elektrik giderleri birbirlerine çok yakın olup, toplam değeri hammadde giderlerinden daha düşüktür.

Şekil 4.2’de ise, yıllık gelirin ürünlere göre dağılımı verilmiştir. Piroliz sonucu kütlece piroliz yağı miktarı en fazla olmasına karşın, en fazla gelir karbon siyahı satışından gelmektedir. Bunun nedeni, proses sonucu oluşan karbon siyahının satış değerinin piroliz yağına göre daha fazla olmasıdır. Çelik ayrıştırma ünitesinden elde edilen hurda çeliğin maddi getirisi de toplam gelirin % 5’ini oluşturmaktadır. Hurda çeliğin bile bu kadar önemli bir getiri sağlaması, lastik üretiminde kullanılan çeliğin ST-52 gibi yüksek kalite bir çelik olmasından kaynaklanmaktadır.

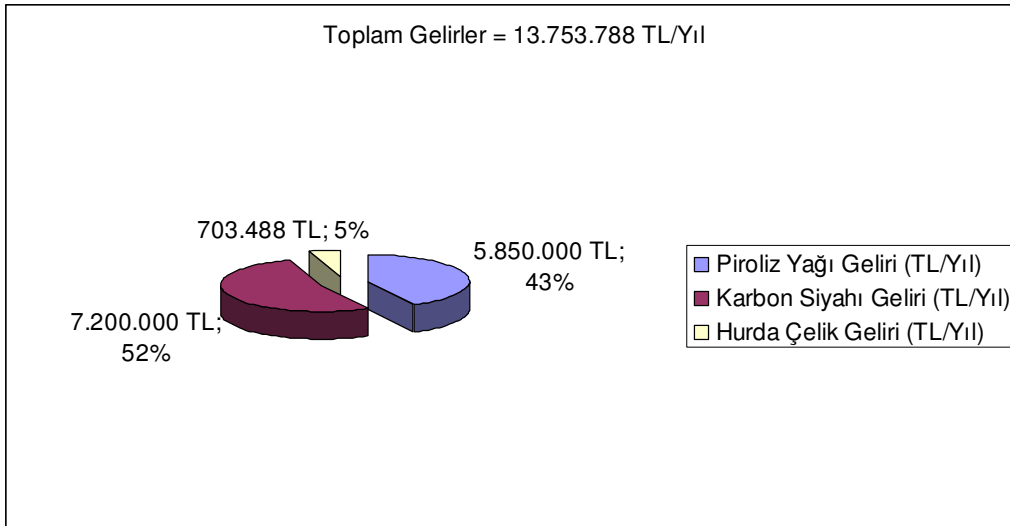
Şekil 4.3’te ise tesisin yıllara göre kümülatif mali akış diyagramı projeden elde edilen toplam kazanç eşliğinde verilmiştir.

Çizelge 4.1: Doğrudan analiz yöntemine göre tesis maliyet bilgileri.

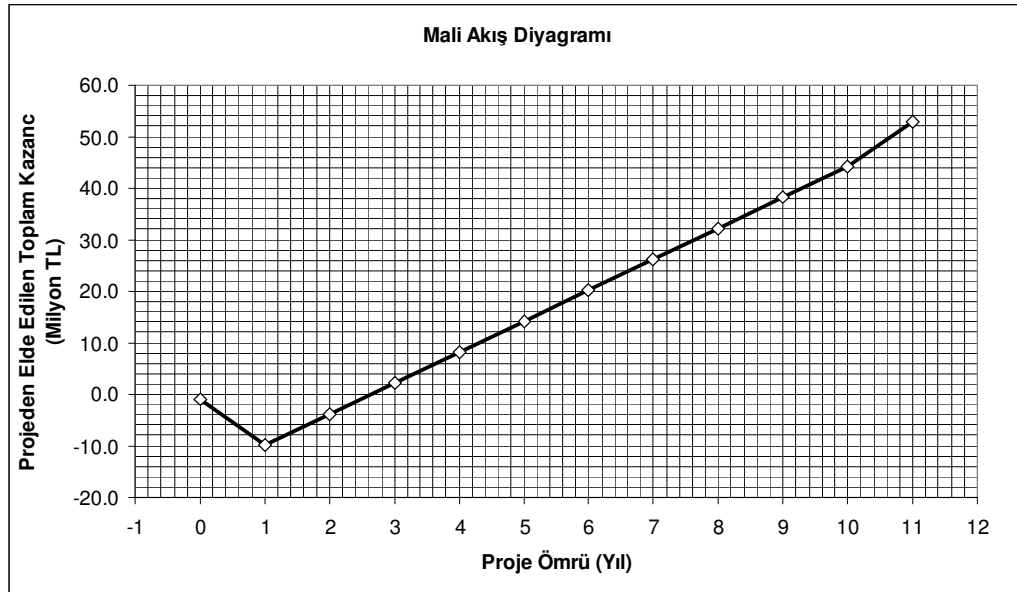
Girdi / Çıktı Adı	Değeri		
	TL	ABD Doları	Avro
Yer	1 000 000	671 141	448 430
C_{TM}	5 055 230	3 392 772	2 266 919
FCI_L	7 940 000	5 328 859	3 560 538
C_W	937 489	629 187	420 399
C_{TI}	8 877 489	5 958 046	3 980 937
C_{RM}	1 160 093 /Yıl	778 585 /Yıl	520 221 /Yıl
C_{UT}	489 600 /Yıl	328 590 /Yıl	219 551 /Yıl
C_{WT}	0	0	0
C_{OL}	535 200 /Yıl	359 194,6 /Yıl	240 000 /Yıl
COM_D	4 902 480 /Yıl	3 290 255 /Yıl	2 198 422 /Yıl
d_k^{SL}	714 600 /Yıl	479 597 /Yıl	320 448 /Yıl
S	718 618	482 294	322 250
R	13 753 788 /Yıl	9 230 730 /Yıl	6 167 618 /Yıl
R_Y	5 878 210 /Yıl	3 945 107 /Yıl	2 635 969 /Yıl
CCP	52 886 650	35 494 396	23 715 987



Şekil 4.1: Yıllık sabit gider miktarları ve oranları.



Şekil 4.2: Yıllık gelirin ürünlere göre dağılımı.



Şekil 4.3: Doğrudan analiz yöntemine göre yıllar içinde projeden elde edilen toplam kazanç.

Elde edilen veriler, Türkiye’de atık lastik piroliz tesisi kurulumunu gerçekleştiren firmadan alınan veri ile karşılaştırılabilir. Yıllık 3000 ton lastik işleme kapasiteli bir tesis için alından fiyat 750 bin Avro’dur [83]. Eşitlik 3.11’de kapasite katsayısı 0,8 olarak gerçekleştirilen hesaplama ile sabit yatırım miktarı 3,4 milyon Avro olarak bulunmaktadır. Bu değer, Çizelge 4.1’de verilen 3,5 milyon Avro’luk sabit yatırım masrafı ile karşılaştırıldığında, tesis için yapılan maliyet hesaplamalarının, tesis kurulumu gerçekleştiren firmalardan alından hesaplamalar ile örtüştüğü ve maliyet analizinin doğrulandığı söylenebilir.

4.3 Şimdiki Değer Yöntemine Göre Maliyet Analizi ve CAPCOST® Programı ile Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu analiz yöntemi, projenin ileriki yıllarında elde edilen net hasılayı şu anki değerine mevcut banka faiz oranını kullanarak dönüştürerek hesaplar ve elde edilen yıllık net hasılanın, yıllar boyunca toplam yatırım miktarına eklenmesi ile elde edilir. Sonuç olarak, proje sonlandırılınca kadar geçen sürede elde edilen toplam kazancın şimdiki değer karşılığını verir.

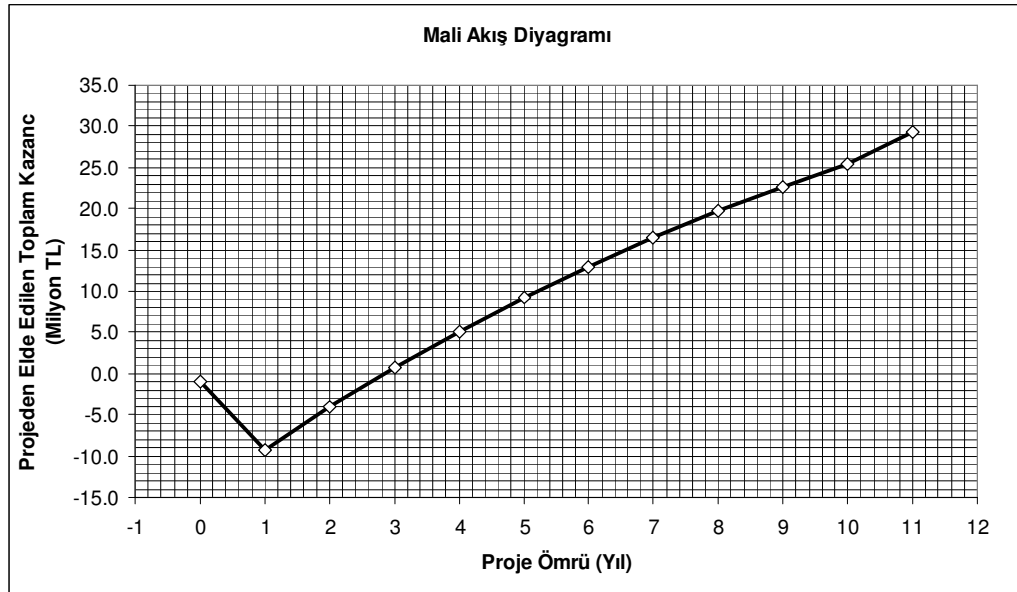
Bu analiz yöntemi için kullanılan denklemler ve sonucunda elde edilen değerler Çizelge 4.1’de verilen değerlerle aynıdır. Tek fark, yıllık net hasılanın yıllar boyunca sabit değil, şimdiki değere dönüştürüldüğü için değişmesidir. Dolayısıyla CCP ve

PBP değerleri bu analiz yönteminde farklıdır. Bu analiz yöntemi için PBP değeri 1,5 yıl iken CCP değeri yaklaşık olarak 30 milyon TL'dir. Bu sonuçlar doğrultusunda, tesisin oldukça karlı bir tesis olduğu ve 1,5 yıl gibi çok kısa bir sürede geri ödemenin gerçekleştiği görülmektedir.

Yıllara göre değişen net hasıla Çizelge 4.2'de verilmiştir. Şekil 4.4'te ise, bu analiz yöntemine göre tesisin yıllara göre kümülatif mali akış diyagramı projeden elde edilen toplam kazanç eşliğinde verilmiştir.

Çizelge 4.2: Şimdiki değer yöntemine göre yıllara göre değişen net hasıla.

Yıl	Miktar		
	TL	ABD Doları	Avro
1	5 146 832	3 454 249	2 307 996
2	4 765 585	3 198 379	2 137 033
3	4 412 579	2 961 462	1 978 735
4	4 085 721	2 742 094	1 832 161
5	3 783 075	2 538 976	1 696 446
6	3 502 847	2 350 904	1 570 783
7	3 243 377	2 176 763	1 454 429
8	3 003 127	2 015 521	1 346 693
9	2 780 673	1 866 223	1 246 938
10	3 746 186	2 514 218	1 679 904



Şekil 4.4: Şimdiki değer yöntemine göre yıllar içinde projeden elde edilen toplam kazanç.

4.4 Karlılığın Değişen Ürün Fiyatlarına Göre Değerlendirilmesi

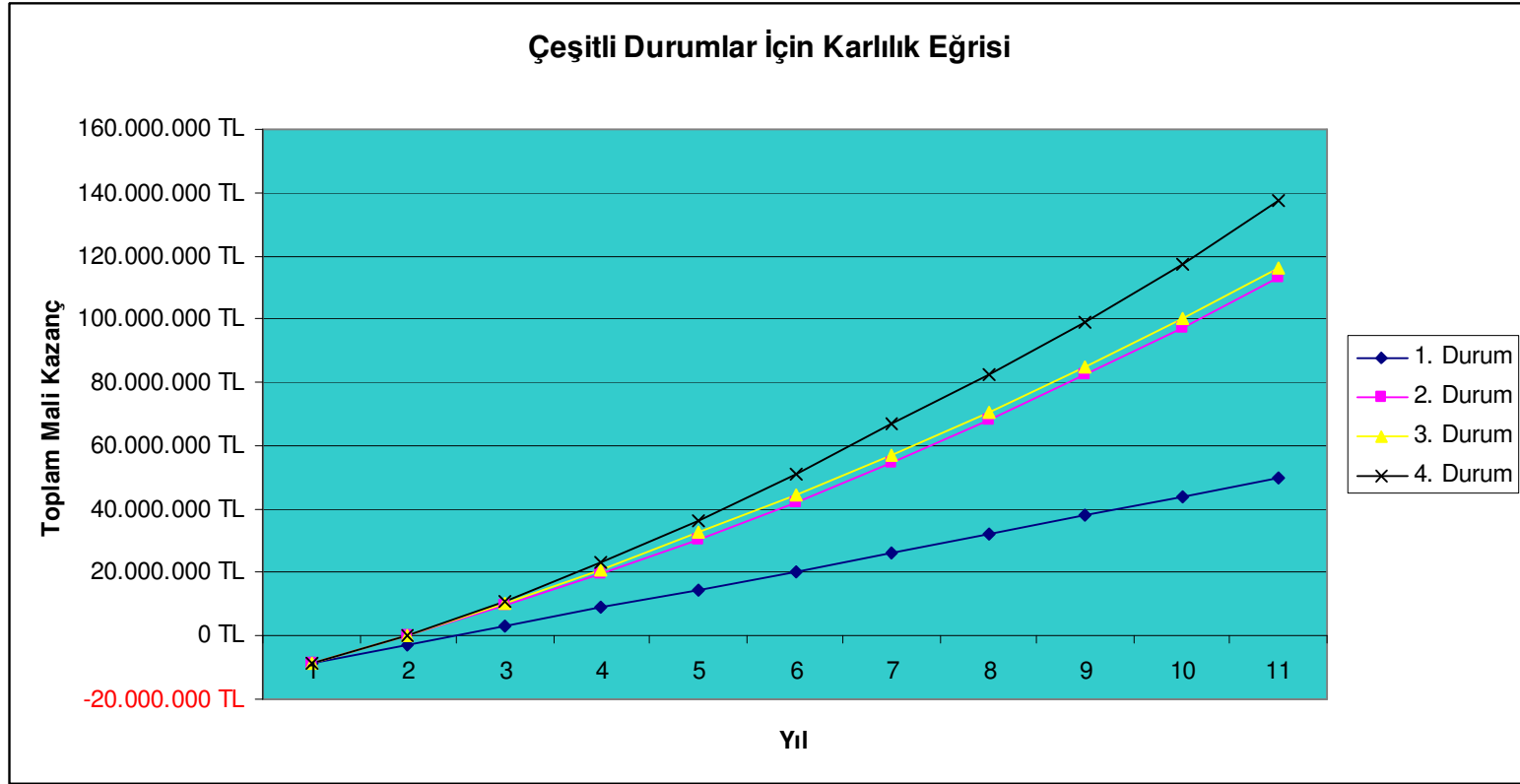
Piroliz sonucu elde edilen karbon siyahı ve piroliz yağı fiyatları dolaylı olarak petrol piyasasından etkilenmektedir. Bu yüzden, ham petrol fiyatlarındaki değişim bu iki ürünün de satış fiyatını etkileyecektir.

Yapılan sektör araştırmasında, karbon siyahı fiyatının son yıllarda sabit kalmıştır fakat bundan sonraki süreçte artış beklenmektedir. Piroliz yağı fiyatı ise, fuel oil fiyatları ile ilişkilendirilebilir. Fuel oil fiyatları, son 3 yılda, şu anki fiyatının % 43 azı ve % 13 fazlası arasında bir değişim göstermektedir. Fakat son 1 yılda, düzenli olarak artmış ve bu artış oranı son 1 yıl için % 30 olarak gözlemlenmiştir [19,84].

Tesis karlılığını bu artışlar ile de gözlemlemek açısından, çeşitli koşullar için karlılık analizi yapılmıştır. Bu koşullar Çizelge 4.3'te verilmiştir. Koşullar belirlenirken, karbon siyahı için yıllık % 15'e varan, piroliz yağı için de yıllık % 20'ye varan bir artış ele alınmış ve yıllık işletme masraflarının ve çelik satış fiyatının değişmediği varsayılmıştır. Karbon siyahı fiyatının belirli bir yıldan sonra tekrar sabit kalması durumu da incelenmiştir. Analiz sonuçları Şekil 4.5'te verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, ürün satış fiyatlarındaki yıllık artış miktarı, karlılığı da doğrudan etkilemektedir. Artış miktarları göz önüne alındığında, tesis geri ödeme süresinin kısaldığı ve proje sonunda tesisin toplam mali kazancının arttığı söylenebilir.

Çizelge 4.3: Karlılık durumunun incelendiği çeşitli durumlar.

Ürünler	Karbon Siyahı	Piroliz Yağı	Durum Adı
Ürün Satış Fiyatı Artış Durumu	Artış yok	Artış yok	1
	Yıllık % 5 artış	Yıllık % 5 artış	2
	İlk 3 yıl % 10 artış, sonra sabit	Yıllık % 10 artış	3
	İlk 5 yıl % 15 artış, sonra sabit	Yıllık % 20 artış	4



Şekil 4.5: Çeşitli durumlar için karlılık değerlendirilmesi.

5. VARGILAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde aşağıda sıralanan başlıklar altında yürütülen çalışma sunulmaktadır:

- Atık lastik pirolizi model tesisi için vargılar
- Atık lastik pirolizi model tesisi için öneriler
- Türkiye atık lastik yönetimi için öneriler

5.1 Atık Lastik Pirolizi Model Tesisi İçin Vargılar

Bu çalışmada Türkiye’de faaliyet gösterecek yıllık 20 bin ton kapasiteli atık lastik piroliz tesisinin tasarımı ve maliyet analizi sonuçları doğrultusunda yapılabilirlik çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir:

1. Yıllık:

- 9000 ton piroliz yağı
- 7200 ton karbon siyahı
- 2200 ton hurda çelik
- 1600 ton piroliz gazı elde edilmektedir.

2. Tesis için mali bilgiler:

- Toplam yatırım maliyeti : 8,877 milyon TL
- Yıllık işletme giderleri : 4,9 milyon TL
- Piroliz yağı geliri : 5,85 milyon TL
- Karbon siyahı geliri : 7,2 milyon TL
- Hurda çelik geliri : 703,5 bin TL
- Yıllık ciro : 13,753 milyon TL
- Yıllık net hasıla : 5,878 milyon TL şeklindedir.

3. Doğrudan maliyet analizi sonucunda:
 - Tesis geri ödeme süresi: 1,3 yıl
 - 10 yıl sonrasında tesisten elde edilecek toplam kazanç: 52,886 milyon TL olarak saptanmıştır.
4. Şimdiki değer yöntemine göre maliyet analizi sonucunda:
 - Tesis geri ödeme süresi: 1,5 yıl
 - 10 yıl sonrasında tesisten elde edilecek toplam kazanç: 29,250 milyon TL olarak saptanmıştır.
5. Her iki analiz sonucunda da tesisin Türkiye şartları için yapılabilir olduğu görülmüştür. Hammadde maliyetinin diğer kimyasal proseslere oranla oldukça düşük olmasından ve yan ürünlerin bile oldukça değerli olmasından dolayı tesis geri ödeme süresi oldukça kısadır. Bu da tesisin yapılabilirliğini arttıran bir diğer etkidir.
6. Maliyet analizi sonucunda elde edilen sabit yatırım miktarının değeri, Türkiye’de tesis kurulumu gerçekleştirecek firmadan alınan fiyatla karşılaştırılmış ve analiz sonucu elde edilen 8 milyon TL’lik sabit yatırım miktarının doğruluğu görülmüştür.
7. Ürün satış fiyatlarının yıllar içinde artması, mevcut piyasa koşulları çerçevesinde beklenmektedir. Bu artış miktarı da, tesis geri ödeme süresini kısaltmakta ve proje sonunda elde edilen toplam mali kazancı arttırmaktadır.
8. Atık lastiklerin çevre ve insan sağlığına etkileri göz ardı edilemeyecek durumdadır. Her ne kadar özellikle ABD’de atık lastikler için atık yönetimi yakmayı teşvik edici olsa da, bu yöntemin çevreye verdiği zararın oldukça büyük olduğu yukarıda belirtilmiştir. Ülkemizdeki “Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği”, atık lastiklerin geri kazanımı esas kılmaktadır ve piroliz yöntemi ortaya çıkan son ürünlerin yüksek maddi değerleri ile iyi bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Elde edilen karbon siyahının ülkemizde yaklaşık 40 bin ton ithalat rakamları göz önüne alındığında, bu ithalat miktarını azaltarak ülkemiz ekonomisine önemli bir katkı sağlayabilme potansiyeline sahiptir. Bir diğer ürün olan piroliz yağı, yüksek aromatik bileşiminden dolayı hem önemli bir kimyasal hammadde

deposu olarak kullanılabilir hem de fuel oil yerini alabilir. Ülkemiz petrokimya endüstrisinin hammadde bazında dışa bağımlı olduğu göz önünde bulundurulursa, piroliz yağı da ülkemize önemli bir katkı sağlayabilme potansiyeline sahiptir. Bu koşullar çerçevesinde, atık lastik pirolizi hem atık geri kazanımını sağladığı için iyi bir atık yönetimi yöntemi olmakta, hem de ürünlerin değerli olmasından dolayı ülkemiz ekonomisine katkı sağlayabilme potansiyeline sahiptir.

5.2 Atık Lastik Pirolizi Model Tesisi İçin Öneriler

Atık lastik piroliz tesisi için maliyet analizi, tesisin sadece piroliz işlemini gerçekleştirdiği durum için gerçekleştirilmiştir. Tesise eklenilecek artı üniteler ile, elde edilen ürünler saflaştırılıp kalitesi arttırılarak daha yüksek bir fiyatla satılabilir. Tesise eklenebilecek artı üniteler ve sonucunda değişen analiz sonucu aşağıda verilmiştir:

1. Elde edilen karbon siyahına asit demineralizasyon ünitesi eklenerek karbon siyahı kalitesi önemli ölçüde arttırılabilir. N550 - N660 kalitesinde satılabilecek karbon siyahı bu ünite ile N220 - N330 kalitesinde satılabilir. Karbon siyahı demineralizasyon ünitesi için 2 milyon TL'lik ek yatırım ile, elde edilen karbon siyahının satış fiyatı 1400 TL/ton tutarına getirilebilir. Bu koşullarda:

- Toplam yatırım maliyeti : 12,77 milyon TL
- Yıllık işletme giderleri : 7,03 milyon TL
- Yıllık ciro : 16,63 milyon TL
- Yıllık net hasıla : 6,60 milyon TL
- Tesis geri ödeme süresi : 1,7 yıl
- 10 yıl sonrasında tesisten elde edilecek toplam kazanç: 55,80 milyon TL olarak değişmektedir.

2. Karbon siyahı saflaştırma ünitesine ek olarak piroliz yağının kalitesi kükürt sıyrıcılar ünitesinin eklenmesi ile arttırılabilir. Kükürt içeriği azaltılmış hafif ve ağır yağ birbirlerine çeşitli oranla harmanlanıp fuel oil no 4 kalitesinde ürün elde edilebilir. 1 milyon TL'lik ek yatırımla piroliz yağı satış fiyatı 1800

TL/ton seviyesine çekilebilir. Karbon siyahı demineralizasyon ünitesine ek olarak kurulacak kükürt giderimi ünitesi eklenme koşullarında:

- Toplam yatırım maliyeti : 14,68 milyon TL
- Yıllık işletme giderleri : 7,77 milyon TL
- Yıllık ciro : 26,98 milyon TL
- Yıllık net hasıla : 12,90 milyon TL
- Tesis geri ödeme süresi : 1,9 yıl
- 10 yıl sonrasında tesisten elde edilecek toplam kazanç: 117,26 milyon TL olarak değişmektedir.

3. Tesisin karlılığını arttırmaya yönelik bir diğer yöntem de piroliz gazlarının değerlendirilmesine yöneliktir. Ateşlemeli ısıtıcıya gelen piroliz gazlarının toplam ısı değeri 36420 MJ/h iken, Çizelge 3.3'te verildiği gibi ateşlemeli ısıtıcı için kullanılacak ısı miktarı 32310 MJ/h'tir. Dolayısıyla, geriye kalan 4110 MJ/h'lik kısmı buhar çevrimi yöntemi ile elektrik enerjisine çevrilebilir ve tesisin elektrik ihtiyacı da karşılanabilir. Bu koşullarda:

- Kullanılabilir piroliz gazı ısı akışı : 1,142 MW
- Buhar çevrimi santral verimi : 0,36
- Elde edilecek elektrik miktarı : 411 kW
- Santral yatırım maliyeti : 310 000 TL
- Toplam yatırım maliyeti : 9,48 milyon TL
- Yıllık işletme giderleri : 4,40 milyon TL
- Yıllık ciro : 13,753 milyon TL
- Yıllık net hasıla : 6,34 milyon TL
- Tesis geri ödeme süresi : 1,3 yıl
- 10 yıl sonrasında tesisten elde edilecek toplam kazanç: 55,82 milyon TL olarak değişmektedir.

5.3 Türkiye Atık Lastik Yönetimi İçin Öneriler

1. Türkiye’de atık lastik yönetimi için yapılması gerekenler T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından çıkartılan ve 26 Kasım 2006 Cumartesi günü 26357 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan “Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği” ile belirlenmiştir.
2. Her ne kadar bu yönetmelik, bakanlığa, il ve çevre müdürlüklerine, belediyelere, lastik üreticilerine çeşitli yetkiler ve sorumluluklar vermiş olsa da, yönetmeliğin uygulanmasında bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu sorunlardan en önemlisi, devletin denetleme konusundaki yetersizliğidir. Bir diğer sorun ise, atık lastik toplama miktarlarının yetersiz kalmasıdır [19].
3. Atık lastik miktarının toplanmasında en büyük sorumluluk vatandaşlara düşmektedir. Bireylerin özellikle yerel yönetimlerce bilinçlendirilerek eski lastiklerini belediyelerin veya bayiliklerin atık lastik depolarına teslim etmesi, bu oranı ciddi bir şekilde arttıracaktır.
4. Atık hiyerarşisinin en üst kademelerinin atığın oluşumunu önleme ve atığın oluşmasını azaltma olduğu düşünülürse, lastik üreticilerinin yüksek verimli ve daha uzun ömürlü lastik üretimini gerçekleştirmelerinin atık lastik miktarını azaltacağına şüphe yoktur. Yanı sıra, atık lastik yönetiminde atık hiyerarşisine uyularak enerji geri kazanımı (yakma) yönteminden olabildiğince uzak kalınmalı ve yeniden kullanım ve geri dönüşüm / malzeme geri kazanımı yöntemleri teşvik edilmelidir.
5. Ülkemizde, son birkaç yılda atık lastik pirolizine ilişkin çok ciddi bir ilgi başlamıştır. Birçok firma atık lastik piroliz tesisi kurmak için girişimlere başlamıştır. Ne yazık ki, bu firmaların çoğu teknik bilgiden yoksun bir biçimde, çoğunlukla kulaktan doğma bilgilerle bu tesisleri kurmaya çalışmaktadır. Hammaddenin karakterizasyonu yapılmadan, laboratuvar ve pilot ölçekte deneme üretimleri olmadan doğrudan tesis kurulumu gerçekleştirilmektedir. Bu çabaların çoğunun hüsrana sonuçlanacağına şüphe yoktur. Bu yüzden, üniversite-devlet işbirliği ile, yatırımcılara örnek oluşturabilecek pilot / yarı ticari ölçekte bir piroliz tesisinin yapılması boşuna

harcanan milyonlarca Türk Lira'sının önüne geçicek, aynı zamanda da atık lastik geri kazanımının gerçekleşmesini sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Otomotiv Sanayii Derneği**, 2009. Otomotiv sanayi 2008 yılı değerlendirme raporu, İstanbul, Türkiye.
- [2] **Gönüllü, M., T.**, 2004. Atık lastiklerin yönetimi. *Katı Atık Geri Dönüşüm Teknolojileri Semineri*, İstanbul Sanayi Odası, İstanbul, 9 Haziran.
- [3] **T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı**, 26357 sayılı Ömrünü tamamlamış lastiklerin kontrolü yönetmeliği, *T.C. Resmî Gazete*, **25 Kasım 2006**.
- [4] **Türk Dil Kurumu – Bilim ve Sanat Terimleri Ana Sözlüğü**, <http://tdkterim.gov.tr/>, 2009.
- [5] **T.C. Devlet Planlama Teşkilatı**, 2008. Araç lastiği-plastik ürünler çalışma grubu raporu, Devlet Planlama Teşkilatı dokuzuncu kalkınma planı, Kimya sanayii özel ihtisas komisyonu, Ankara, Türkiye.
- [6] **Batır, B.**, 2002. Türkiye için kullanılmış lastik yönetimi araştırması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] **Geredelioglu, C., O.**, 1997. Taşıt Lastikleri. TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Ankara.
- [8] **Sivri Otomotiv Sitesi**, <http://sivriotomotiv.com/>, 2009.
- [9] **Keskin Otomotiv Sitesi**, <http://www.keskinotomotiv.com.tr/>, 2009.
- [10] **Özka Lastik Sitesi**, <http://www.ozkalastik.com/>, 2009.
- [11] **U.S. Rubber Manufacturers Association Sitesi**, <http://www.rma.org/>, 2009.
- [12] **Juma, M., Korenova, Z., Markos, J., Annus, J., Jelemensky, L.**, 2006. Pyrolysis and combustion of scrap tire, *Petroleum & Coal*, **48**, 15-26.
- [13] **Kauçuk Bilgi Rehberi Sitesi**, <http://www.kaucuk.org/>, 2009.
- [14] **Andrew, C.**, 2001. An Introduction to Rubber Technology. Rapra Technology Ltd., Shrewsbury, U.K.
- [15] **Pandül, E., Z.**, 1999. Atık lastiklerin piroliz kinetiğinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [16] **Mahidol University Sitesi**, <http://www.mahidol.ac.th/>, 2009.
- [17] **The American Phytopathological Society Sitesi**, <http://www.apsnet.org/>, 2009.
- [18] **T.C. Devlet Planlama Teşkilatı**, 2001. Kauçuk ürünleri özel ihtisas komisyonu raporu karbon siyahı ve sentetik kauçuk alt komisyonu raporu, Devlet Planlama Teşkilatı dokuzuncu kalkınma planı, Kimya sanayii özel ihtisas komisyonu, Ankara, Türkiye.
- [19] **Türkiye Petrol Rafinereleri A.Ş.**, 2009. Kişisel görüşme.

- [20] **Rodgers, B., Waddell, W.**, 2005. Tire Engineering, in Science and Technology of Rubber, pp. 619-661, Eds. Mark, E. J., Erman, B. & Eirich, F., R., Elsevier Academic Press, Amsterdam, Boston.
- [21] **University of Bristol Sitesi**, <http://www.bris.ac.uk/>, 2009.
- [22] **Hürriyet Oto Sitesi**, <http://www.hurriyetoto.com>, 2009.
- [23] **Reuters Sitesi**, <http://www.reuters.com/>, 2009.
- [24] **Lastik Sanayicileri Derneği**, 2009. Kişisel görüşme.
- [25] **State of Ohio Environmental Protection Agency**, 2007. What is a scrap tire?, Ohio, ABD.
- [26] **Rubber Manufacturers Association**, 2006. Scrap tire markets in the United States: 2005 edition, Washington DC, ABD
- [27] **Reshner, K.**, 2008. Scrap tire recycling: A summary of prevalent disposal and recycling methods,
http://www.entireengineering.de/str/Scrap_Tire_Recycling.pdf.
- [28] **World Business Council for Sustainable Development**, 2008. Managing end-of-life tires, Cenevre, İsviçre.
- [29] **Eren, A.**, 2005. Dönüştürülen lastikler, *Buğday*, **34**.
- [30] **UNEP, Basel Convention**, 2008. Revised technical guidelines on environmentally sound management of used tires, Bazel, İsviçre.
- [31] **T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, Atık Yönetimi Dairesi Başkanlığı**, 2009. Katı atıkların geri kazanımı ve buna yönelik toplama işlemleri, <http://www.atikyonetimi.cevreorman.gov.tr/evsel/16.doc>.
- [32] **United States, Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste**, 1991. Markets for scrap tires, Washington DC, ABD
- [33] **T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, Atık Yönetimi Dairesi Başkanlığı**, 2009. Tehlikeli ve özel atıkları ilave yakıt olarak kullanmak üzere lisans alan firmalar, Ankara, Türkiye.
- [34] **Technical Working Group of the Basel Convention**, 1999. Technical guidelines on the identification and management of used tyres in Bazel, İsviçre.
- [35] **Atech Group**, 2001. A national approach to waste tires, Sidney, Avustralya.
- [36] **T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, Atık Yönetimi Dairesi Başkanlığı**, 2009. Ömrünü tamamlamış lastiklerin kontrolü yönetmeliği'ne göre geri kazanım lisansı/ çalışma izni alan firmalar Ankara, Türkiye.
- [37] **Paine, K., A., Moroney, R., C., Dhir, R., K.**, 2004. Application of granulated rubber to improve thermal efficiency of concrete, in *Sustainable Waste Management and Recycling: Used/Post-Consumer Tyres*, pp. 85-95, Eds. Limbachiya, M., C. & Robert, J., J.
- [38] **Sever, A.**, 1998. Kolza sap-samanı eldesi ve tanımlanması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [39] **Tetik, E.**, 1997. Kolza sap-samanının pirolizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [40] Cao, Q., Jin, L., Bao, W., Lv, Y., 2009. Investigation into the characteristics of oil produced from co-pyrolysis of biomass and tire, *Fuel Processing Technology*, **90**, 337-342.
- [41] Reaven, S., J., 1994. Prospects for pyrolysis technologies in managing municipal, industrial and domestic cleanup wastes, Report, New York.
- [42] Roy, C., Pakdel, H., Pantea, D., M., 1998. The vacuum pyrolysis of used tires end-uses for oil and carbon black products, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **51**, 201-221
- [43] Riso National Laboratory, 2003. New and emerging bioenergy technologies, Riso Energy Report 2, Ireland.
- [44] Mui, E., L., K., Lee, V., K., C., Cheung, W., H., McKay, G., 2008. Kinetic modelling of waste tire carbonization, *Energy & Fuels*, **22**, 1650-1657.
- [45] U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy Sites, http://www1.eere.energy.gov/biomass/large_scale_gasification.html, 2009.
- [46] Galvagno, S., Casciaro, G., Casu, S., Martino, M., Mingazzini, C., Russo, A., Portofino, S., 2009. Steam gasification of tyre waste, poplar, and refuse-derived fuel: A comparative analysis, *Waste Management*, **29**, 678-689.
- [47] Xiao, G., Ni, M.-J., Chi, Y., Cen, K.-F., 2008, Low-temperature gasification of waste tire in a fluidized bed, *Energy Conversion and Management*, **49**, 2078-2082.
- [48] California Environmental Protection Agency, Integrated Waste Management Board, 2006. Technology evaluation and economic analysis of waste tire pyrolysis, gasification, liquefaction, California, ABD
- [49] Caballero, B., M., Marco, I., Torres, A., Chomon, M., J., Laresgoiti, M.F., 2004. Chemical recycling of post-consumer tyres, in *Sustainable Waste Management and Recycling: Used/Post-Consumer Tyres*, pp. 215-225, Eds. Limbachiya, M., C. & Robert, J., J.
- [50] European Commission Sites, <http://ec.europa.eu/environment/waste/index.htm>, 2009.
- [51] The Council of the European Union, 1999. Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste.
- [52] U.S. Rubber Manufacturers Association, 2007. State legislation-scrap tire disposal, Washington DC, ABD
- [53] California Environmental Protection Agency, Integrated Waste Management Board, 1995. Environmental factors of waste tire pyrolysis, gasification, liquefaction, California, ABD
- [54] Piskorz, J., Majerski, P., Radlein, D., Wik, T., Scott, D., S., 1999. Recovery of carbon black from scrap rubber, *Energy Fuels*, **13**, 544-551.

- [55] Galvagno, S., Casu, S., Martino, M., Di Palma, E., Portofino, S., 2007. Thermal and kinetic study of tyre waste pyrolysis via TG-FTIR-MS analysis, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **88**, 507-514.
- [56] Siedelt, S., Müller-Hagedorn, M., Bockhorn, H., 2006. Description of tire pyrolysis by thermal degradation behaviour of main components, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **75**, 11-18.
- [57] Rofiqul, I., M., Haniu, H., Rafiqul, A., B., M., 2007. Limonene-rich liquids from pyrolysis of heavy automotive tire wastes, *Journal of Environment and Engineering*, Vol 2, No 4, 681-695.
- [58] Olazar, M., Lopez, G., Arbiourrutia, M., Elordi, G., Aguado, R., Bilbao, J., 2008. Kinetic modelling of tyre pyrolysis in a conical spouted bed reactor, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **81**, 127-132.
- [59] Leung, D., Y., C., Wang, C., L., 1998. Kinetic study of scrap tyre pyrolysis and combustion, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **45**, 153-169.
- [60] Laresgoiti, M.F., Caballero, B., M., Marco, I., Torres, A., Cabrero, M., A., Chomon, M., J., 2004. Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **71**, 917-934.
- [61] Korenova, Z., Juma, M., Annus, J., Markos, J., Jelemensky, L., 2006. Kinetics of pyrolysis and properties of carbon black from a scrap tire, *33rd International Conference of the Slovak Society of Chemical Engineering*, Tatranske, Matliare, 22-26 May, 422-426.
- [62] Kyari, M., Cunliffe, A., Williams, T., P., 2005. Characterization of oils, gases and char in relation to the pyrolysis of different brands of scrap automotive tires, *Energy & Fuels*, **19**, 1165-1173.
- [63] Rofiqul, I., M., Haniu, H., Rafiqul, A., B., M., 2007. Liquid fuels and chemicals from pyrolysis of motorcylce tire waste: Product yields, compositions and related properties, *Fuel*, **87**, 3112-3122.
- [64] TS 2177, 2006. Fuel oil standardı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [65] Gönüllü, M., T., Goncaoglu, B., Arslankaya, E., 1999. Hurda lastiklerin pirolizi için işletme parametrelerinin araştırılması, *Kent Yönetimi İnsan ve Çevre Sorunları Sempozyumu'99*, İstanbul, Türkiye, Şubat 17-19.
- [66] Shah, J., Jan, R., M., Mabood, F., Shahid, M., 2006. Conversion of waste tires into carbon black and their utilization as adsorbent, *Journal of Chinese Chemical Society*, **53**, 1085-1089.
- [67] Unapumnuk, K., Keener, C., T., Lu, M., Liang, F., 2008. Investigation into the removal of sulfur from tire derived fuel by pyrolysis, *Fuel*, **87**, 951-956.
- [68] Roy, C., Pakdel, H., Pantea, D., M., 2001. Production of dl-limonene by vacuum pyrolysis of used tires, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **57**, 91-107

- [69] Li, S.-Q., Yao, Q., Chi, Y., Yan, J.-H., Cen, K.-F., 2004. Pilot scale pyrolysis of scrap tires in a continuous rotary kiln reactor, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **43**, 5133-5145.
- [70] Pozan, S., G., Yaşar, M., Gürgey, İ., 2005. Atık lastiklerden aktif karbon üretimi, *II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi*, İstanbul, Türkiye, Kasım 17-19.
- [71] Murugan, S., Ramaswamy, M., C., Nagarajan, G., 2008. A comparative study on the performance, emission and combustion studies of a DI diesel engine using distilled tyre pyrolysis oil-diesel blends, *Fuel*, **87**, 2111-2121.
- [72] Shah, J., Jan, M., R., Mabood, F., 2008. Catalytic pyrolysis of waste tyre rubber into hydrocarbons via base catalysts, *Iran Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, **Vol 27 No 2**, 103-109.
- [73] Boxiong, S., Chunfei, W., Binbin, G., Rui, W., Liangcai, 2007. Pyrolysis of waste tyres with zeolite USY and ZSM-5 catalysts, *Applied Catalysis B: Environmental*, **73**, 150-157.
- [74] Williams, P., T., Brindle, A., J., 2002. Catalytic pyrolysis of tyres: influence of catalyst temperature, *Fuel*, **81**, 2425-2434.
- [75] Roy, C., Plante, P., Caumia de, B., 2004. Oil and carbon black by pyrolysis of used tires, in *Sustainable Waste Management and Recycling: Used/Post-Consumer Tyres*, pp. 17-33, Eds. Limbachiya, M., C. & Robert, J., J.
- [76] Innovative Ecology Firması Resmi Web Sitesi, 2009. <http://www.in-eco.com/docs/SalesPamphletRev.3.0MTC.pdf>.
- [77] United States Environmental Protection Agency, 1991. Burning tires for fuel and tire pyrolysis: Air implications, Report, North Carolina.
- [78] Yongrong, Y., Jizhong, C., Guibin, Z., 2000. Technical advance on the pyrolysis of used tires in China, *China-Japan International Academic Symposium Environmental Problem in Chinese Iron-Steelmaking Industries and Effective Technology Transfer*, Sendai, Japonya, Mart 6.
- [79] Roy, C., 2009. Kişisel görüşme.
- [80] Türkiye ve yurtdışında üretim ve satış yapan firmalardan alınan ortalama fiyatlar.
- [81] Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası Resmi Web Sitesi, 2009. <http://www.tcmb.gov.tr/>
- [82] Turton, R., Bailie, R., C., Whiting, W., B., Shaeiwitz, J., A., 2002. Analysis, Syntnesis, and Design of Chemical Processes, Upper Saddle River, New Jersey (2. baskı)
- [83] Fufu Pazarlama, Mustafa Bozkurt. 2009. Kişisel görüşme.
- [84] OPET firması resmi Web Sitesi, 2009. <http://www.opet.com.tr/>

EKLER

EK A.1 : ChemCAD® programı ile gerçekleştirilen simülasyon sonuçları

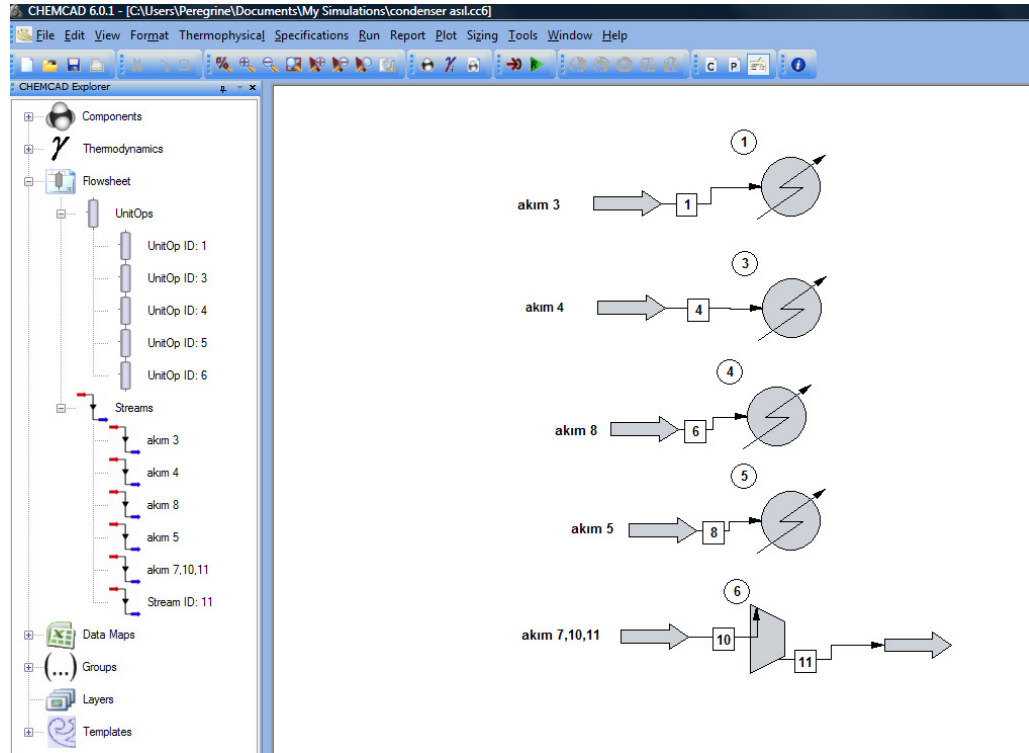
EK A.2 : SIMSCI PROII® programı ile gerçekleştirilen simülasyon sonuçları

EK A.3 : Proses Ekipman Tablosu, Proses Akım Tablosu ve Servis Akımları
Tablosu

EK A.1 : Chemcad® Programı İle Gerçekleştirilen Simülasyon Sonuçları

ChemCAD® programı ile akımların içeriği tanımlanmış ve akımların molar akışı ChemCAD® programı ile hesaplanmıştır. Şekil A.1’de tanımlanan bu akımlar verilmiştir. Akım isimleri Şekil 3.4’teki akım numaralarını temsil etmektedir. Çizelge A.1’de ise bu simülasyonun sonucu verilmiştir. Çizelge 3.4’te verilen mol akış bilgilerinde, ChemCAD® programı girilen kütle fraksiyonlarının ondalık kısmını değiştirdiğinden 4. ve 5. akımın toplamı 3. akımı doğrulamamaktadır. Bu yüzden, kütle fraksiyonu değişmemiş olan 7. ve 8. akımlardan geriye dönülerek sağlama gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, akımların buhar fraksiyonundaki değerlerin simülasyon programındakiler ile aynı çıkmasıyla prosesin doğrulanması gerçekleştirilmiştir.

Şekil A.1: ChemCAD® programında akım özelliklerinin bulunması için gerçekleştirilen simülasyon.



Çizelge A.1: ChemCAD® programında akım özelliklerinin bulunması için gerçekleştirilen simülasyonun sonuçları.

CHEMCAD 6.0.1
Page 1

Job Name: condenser asıl Date: 12/08/2009 Time: 01:03:02

Stream No.	1	4	6
8			
Stream Name	akım 3	akım 4	akım 8
akım 5			
Temp C	500.0000*	80.0000*	20.0000*
80.0000*			
Pres kPa	20.0000*	20.0000*	20.0000*
20.0000*			
Enth MJ/h	1371.5	-750.17	-93.287
-688.38			
Vapor mole fraction	1.0000	1.0000	0.00000
0.00000			
Total kmol/h	63.0399	44.0881	12.6443
2.5077			
Total kg/h	2988.8131	1682.9001	1350.1103
525.6000			
Total std L m3/h	4.5626	2.7567	1.5584
0.6151			
Total std V m3/h	1412.96	988.17	283.40
56.21			
Component mass %			
D-Limonene	20.999992	27.570006	34.443399
0.000000			
Styrene	6.000001	7.859995	9.819599
0.000000			
O-Xylene	6.800000	8.919998	11.143799
0.000000			
Ethylbenzene	3.400002	4.464300	5.577300
0.000000			
Toluene	10.200000	13.389999	16.728200
0.000000			
Benzene	8.499999	11.159999	13.942301
0.000000			
Cis-1,4-Dimethyl	2.550000	3.340000	4.172701
0.000000			
1-Ethyl-3-Methyl	2.550001	3.339999	4.172699
0.000000			
2,3,5-Trimethyln	8.499999	0.000000	0.000000
35.720000			
N-Heptadecane	15.300000	0.000000	0.000000
64.279997			
Carbon Dioxide	5.600001	7.352895	0.000000
0.000000			
Carbon Monoxide	0.700000	0.917000	0.000000
0.000000			
Hydrogen	2.100000	2.757300	0.000000
0.000000			
Methane	1.400000	1.838199	0.000000
0.000000			
Ethane	1.200000	1.575600	0.000000
0.000000			

Çizelge A.1: ChemCAD® programında akım özelliklerinin bulunması için gerçekleştirilen simülasyonun sonuçları (Devam).

Ethene	1.110000	1.457500	0.000000
0.000000			
Propane	0.810000	1.063500	0.000000
0.000000			
Propene	0.720000	0.945400	0.000000
0.000000			
2-Methylpropane	0.180000	0.236300	0.000000
0.000000			
1-Butene	0.700000	0.919100	0.000000
0.000000			
1,3-Butadiene	0.680000	0.892900	0.000000
0.000000			

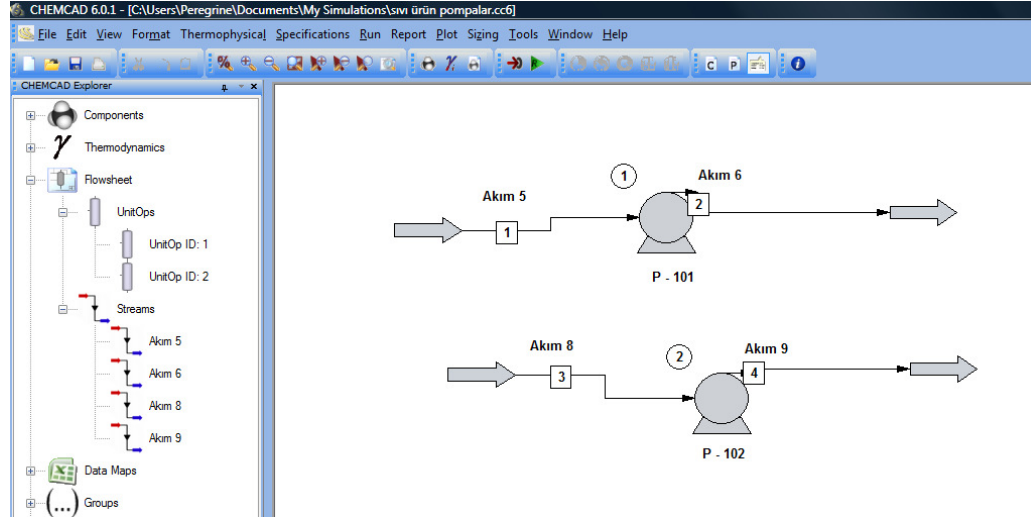
Page 2

Job Name: condenser asıl Date: 12/08/2009 Time: 01:03:02

Stream No.	10	11
Stream Name	akım 7,10,11	
Temp C	20.0000*	269.4191
Pres kPa	20.0000*	170.0000
Enth MJ/h	-1351.4	-1083.6
Vapor mole fraction	1.0000	1.0000
Total kmol/h	31.2404	31.2404
Total kg/h	333.3603	333.3602
Total std L m3/h	1.1930	1.1930
Total std V m3/h	700.21	700.21
Component mass %		
D-Limonene	0.000000	0.000000
Styrene	0.000000	0.000000
O-Xylene	0.000000	0.000000
Ethylbenzene	0.000000	0.000000
Toluene	0.000000	0.000000
Benzene	0.000000	0.000000
Cis-1,4-Dimethyl	0.000000	0.000000
1-Ethyl-3-Methyl	0.000000	0.000000
2,3,5-Trimethyln	0.000000	0.000000
N-Heptadecane	0.000000	0.000000
Carbon Dioxide	36.846110	36.846110
Carbon Monoxide	4.595197	4.595198
Hydrogen	13.817099	13.817103
Methane	9.211398	9.211398
Ethane	7.895501	7.895502
Ethene	7.303702	7.303704
Propane	5.329299	5.329300
Propene	4.737500	4.737500
2-Methylpropane	1.184100	1.184100
1-Butene	4.605701	4.605701
1,3-Butadiene	4.474400	4.474401

Şekil A.2’de ise P-101 ve P-102 pompalarının simülasyonu verilmiştir. Bu simülasyona ilişkin çıktılar ise Çizelge A.2’de gösterilmiştir.

Şekil A.2: P-101 ve P-101 pompaları için simülasyon.



Çizelge A.2: P-101 ve P-101 pompaları için simülasyon sonuçları.

CHEMCAD 6.0.1

Page 1

Job Name: sıvı ürün pompalar Date: 12/08/2009 Time: 01:25:57

Pump Summary

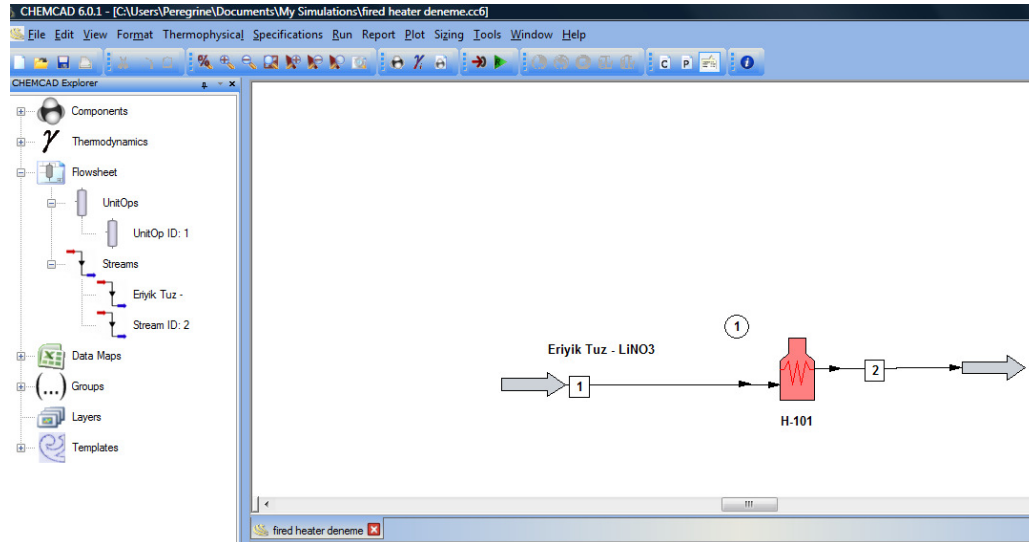
Equip. No.	1	2	
Name			
Output pressure kPa	101.3250	101.3250	
Efficiency	0.7500	0.7500	
Calculated power kW	0.0195	0.0474	
Calculated Pout kPa	101.3250	101.3250	
Head m	10.2263	9.6537	
Vol. flow rate m3/h	0.6475	1.5717	
Mass flow rate kg/h	525.0399	1350.1099	
Stream No.	1	2	3
4			
Stream Name	Akım 5	Akım 6	Akım 8
Akım 9			
Temp C	80.0000*	80.0632	25.0000*
25.0710			
Pres kPa	20.0000*	101.3250	20.0000*
101.3250			
Enth MJ/h	-687.65	-687.58	-90.227
-90.056			
Vapor mole fraction	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000			
Total kmol/h	2.5050	2.5050	12.1455
12.1455			
Total kg/h	525.0399	525.0399	1350.1098
1350.1098			

Çizelge A.2: P-101 ve P-101 pompaları için simülasyon sonuçları (Devam).

Total std L m3/h	0.6145	0.6145	1.5550
1.5550			
Total std V m3/h	56.15	56.15	272.23
272.23			
Component mass %			
D-Limonene	0.000000	0.000000	34.443399
34.443399			
Styrene	0.000000	0.000000	16.728199
16.728199			
O-Xylene	0.000000	0.000000	13.942300
13.942300			
Ethylbenzene	0.000000	0.000000	11.143800
11.143800			
Toluene	0.000000	0.000000	9.819601
9.819601			
Benzene	0.000000	0.000000	5.577300
5.577300			
Cis-1,4-Dimethyl	0.000000	0.000000	4.172700
4.172700			
1-Ethyl-3-Methyl	0.000000	0.000000	4.172700
4.172700			
N-Heptadecane	64.279997	64.279997	0.000000
0.000000			
2,3,5-Trimethyln	35.720000	35.720000	0.000000
0.000000			

Şekil A.3'te ise H-101 ateşlemeli ısıtıcısı için simülasyon verilmiştir. Bu simülasyona ilişkin çıktılar ise Çizelge A.3'te gösterilmiştir.

Şekil A.3: H-101 ateşlemeli ısıtıcısı için simülasyon.



Çizelge A.3: H-101 ateşlemeli ısıtıcısı için simülasyon sonuçları.

CHEMCAD 6.0.1

Page 1

Job Name: fired heater deneme Date: 12/08/2009 Time: 01:32:55

Fired Heater Summary

Equip. No.	1
Name	
Temperature Out C	530.0000
Fuel Heating Value	813.0000
Thermal Efficiency	0.7500
Heat Absorbed MJ/h	32310.5957
Fuel Usage (SCF)	50224.5430

Job Name: fired heater deneme Date: 12/08/2009 Time: 01:33:12

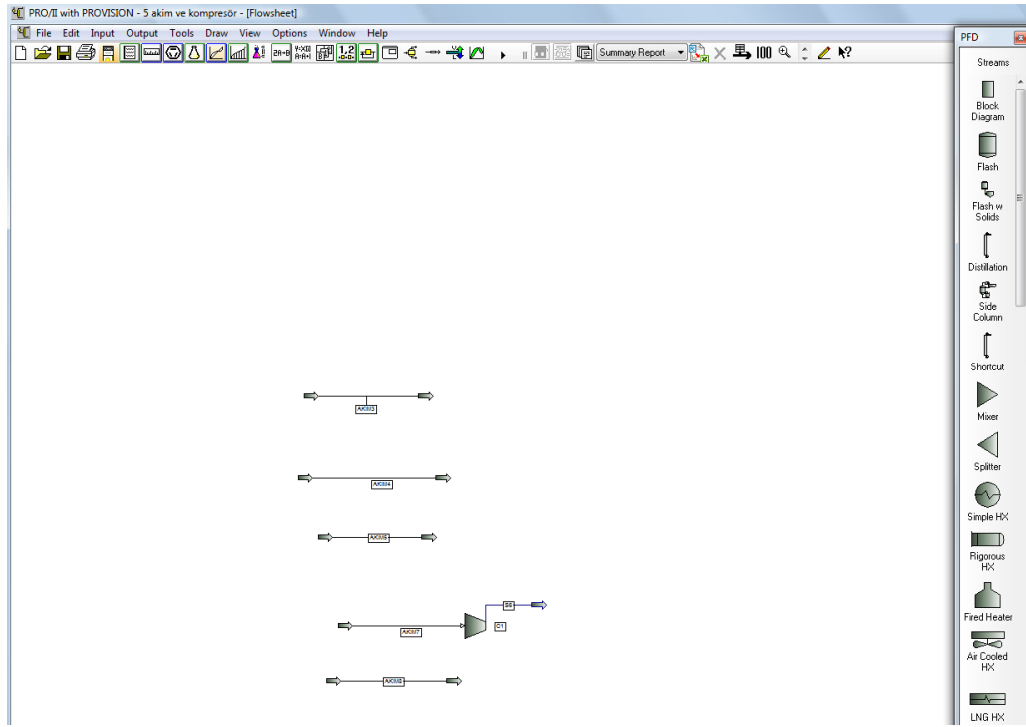
Stream No.	1	2
Stream Name	Eriyik Tuz -	
Temp C	260.0000*	530.0000
Pres kPa	101.0000*	101.0000
Enth MJ/h	-5.3043E+005	-4.9811E+005
Vapor mole fraction	0.00000	0.00000
Total kmol/h	471.3978	471.3978
Total kg/h	32500.0000	32500.0000
Total std L m3/h	5.8005	5.8005
Total std V m3/h	10565.74	10565.74
Flowrates in kg/h		
Carbon Dioxide	0.0000	0.0000
Carbon Monoxide	0.0000	0.0000
Hydrogen	0.0000	0.0000
Methane	0.0000	0.0000
Ethane	0.0000	0.0000
Ethene	0.0000	0.0000
Propane	0.0000	0.0000
Propene	0.0000	0.0000
2-Methylpropane	0.0000	0.0000
1-Butene	0.0000	0.0000
1,3-Butadiene	0.0000	0.0000
LiNO3	32500.0000	32500.0000

ChemCAD® programında, kompresör ve yoğunlaştırma kuleleri için de simülasyon yapılmış, fakat ChemCAD® programında entalpi değerleri negatif çıktığından bu ekipmanlar için simülasyon SIMSCI PROII® programında gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyona ilişkin sonuçlar Ek A.2’de verilmiştir.

EK A.2 : SIMSCI PROII® Programı İle Gerçekleştirilen Simülasyon Sonuçları

ChemCAD® programı ile gerçekleştirilemeyen simülasyonlar, daha iyi sonuç verdiği için SIMSCI PROII® programı ile gerçekleştirilmiştir. Fakat, akım bilgilerini içeren simülasyon, entalpi değerlerini görmek açısından bir de bu programda verilmiştir. Bir üst başlıkta verilen pompa ve ateşlemeli ısıtıcı simülasyonları bu program ile gerçekleştirilmemiştir. Bunun nedeni SIMSCI PROII® programında limonen, 1-etil-3-metilbenzen, trimetilnaftalen ve lityum nitrat bileşiklerinin tanımlı olmayışdır. Bu yüzden SIMSCI PROII® programında simülasyon çalıştırılırken, limonenin kütlesek fraksiyonu toluene, 1-etil-3-metilbenzenin kütlesek fraksiyonu dimetilsiklohekzene ve trimetinaftalenin kütlesek fraksiyonu heptadekana eklenmiştir. Şekil A.4'te akım bilgileri ve C-101 kompresörü için gerçekleştirilen simülasyon, Çizelge A.4'te ise bu simülasyonun çıktıları verilmiştir. Şekil A.5'te yoğunlaştırıcılar için simülasyon ve Çizelge A.5'te ise bunun çıktıları verilmiştir.

Şekil A.4: Akım bilgileri ve C-101 kompresörü için gerçekleştirilen simülasyon.

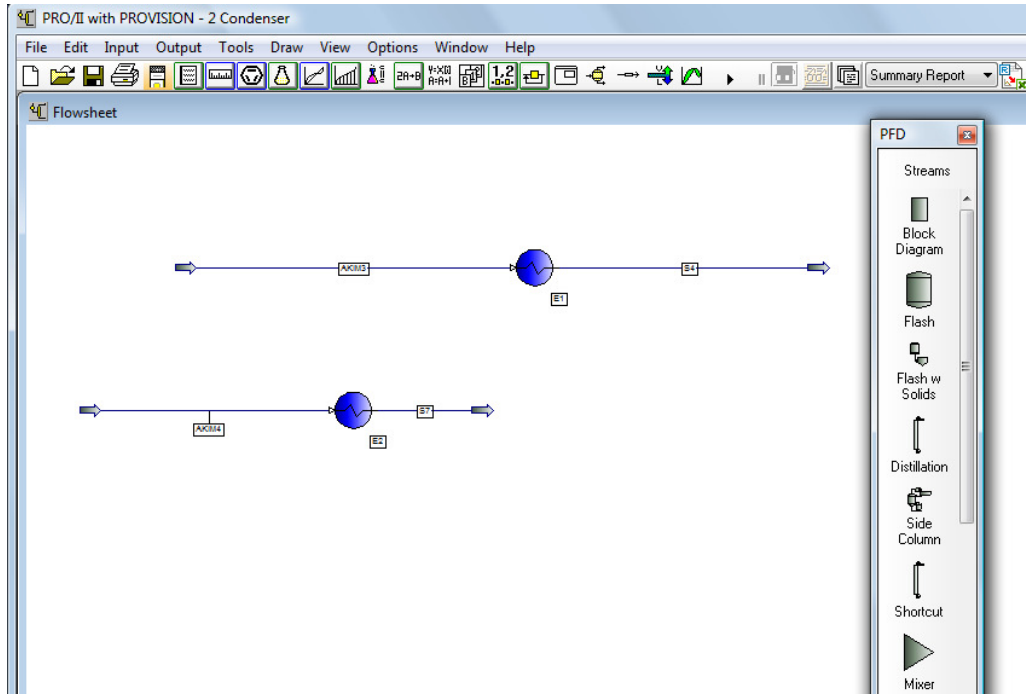


Çizelge A.4: Akım bilgileri ve C-101 kompresörü için gerçekleştirilen simülasyon çıktıları.

STREAM ID	AKIM3	AKIM4	AKIM5	AKIM7	AKIM8	
NAME	Piroliz	Yogunlasmaya	agir yag 2.	condenser	2. condenser	
	Sonucu	n Gazlar		gaz urun	hafif yag	
	Olusan					
	Gazlar					
PHASE	VAPOR	VAPOR	LIQUID	VAPOR	LIQUID	
THERMO ID	SRK01	SRK01	SRK01	SRK01	SRK01	
FLUID WEIGHT FRACTIONS						
1	TOLUENE	0.3120	0.4096	0.0000	0.0000	0.5118
2	BENZENE	0.0850	0.1116	0.0000	0.0000	0.1394
3	OXYLENE	0.0680	0.0892	0.0000	0.0000	0.1114
4	STYRENE	0.0600	0.0786	0.0000	0.0000	0.0982
5	EBENZENE	0.0340	0.0446	0.0000	0.0000	0.0558
6	1T4H	0.0510	0.0668	0.0000	0.0000	0.0834
7	CO2	0.0560	0.0735	0.0000	0.3685	0.0000
8	CO	7.0000E-03	9.1700E-03	0.0000	0.0460	0.0000
9	H2	0.0210	0.0276	0.0000	0.1382	0.0000
10	METHANE	0.0140	0.0184	0.0000	0.0921	0.0000
11	ETHANE	0.0120	0.0158	0.0000	0.0790	0.0000
12	ETHYLENE	0.0111	0.0146	0.0000	0.0730	0.0000
13	PROPANE	8.1000E-03	0.0106	0.0000	0.0533	0.0000
14	PROPENE	7.2000E-03	9.4540E-03	0.0000	0.0474	0.0000
15	BUTANE	1.8000E-03	2.3630E-03	0.0000	0.0118	0.0000
16	1BUTENE	7.0000E-03	9.1910E-03	0.0000	0.0461	0.0000
17	12BD	6.8000E-03	8.9290E-03	0.0000	0.0447	0.0000
18	HDECANE	0.2380	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
TOTAL RATE, KG/HR		2208.4991	1682.8992	525.6000	333.3600	1350.1100
TEMPERATURE, C		500.0000	80.0000	80.0000	25.0000	25.0000
PRESSURE, KPA		20.0000	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000
ENTHALPY, M*KJ/HR		3.3912	0.8660	0.0944	0.1037	0.0613
MOLECULAR WEIGHT		46.0859	36.7844	240.4728	10.6711	94.3385
WEIGHT FRAC VAPOR		1.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000
WEIGHT FRAC LIQUID		0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000
SIMULATION SCIENCES INC.		R	PAGE P-8			
PROJECT		PRO/II VERSION 8.0 ELEC V6.6				
PROBLEM		OUTPUT				
		STREAM WEIGHT COMPONENT FRACTIONS				
		12/08/09				

Feeds Products	AKIM7 S6	
	User Input	Calculated
Outlet Temperature, C		195.80
Outlet Pressure, KPA	101.32	101.32
Pressure Increase, KPA		81.32
Actual Work, KW		52.24
Head, M		57503.12
Adiabatic Efficiency		81.90
Polytropic Efficiency	85.00	85.00
After Cooler DP, KPA	Default	0.00

Şekil A.5: Yoğunlaştırıcılar için simülasyon.



Çizelge A.5: Yoğunlaştırıcılar için simülasyon sonuçları.

	UNIT 1, 'E1'		UNIT 3, 'E2'	
OPERATING CONDITIONS				
DUTY, M*KJ/HR	2.445		0.458	
LMTD, C	196.379		25.709	
F FACTOR (FT)	0.953		0.848	
MTD, C	187.212		21.801	
U*A, KW/K	3.627		5.839	
HOT SIDE CONDITIONS				
	INLET	OUTLET	INLET	OUTLET
FEED	AKIM3		AKIM4	
MIXED PRODUCT		S4		S7
VAPOR, KG-MOL/HR	47.921	45.314	45.750	38.005
K*KG/HR	2.208	1.644	1.683	0.932
CP, KJ/KG-C	2.944	1.770	1.761	1.856
LIQUID, KG-MOL/HR		2.607		7.745
K*KG/HR		0.564		0.751
CP, KJ/KG-C		2.272		1.654
TOTAL, KG-MOL/HR	47.921	47.921	45.750	45.750
K*KG/HR	2.208	2.208	1.683	1.683
CONDENSATION, KG-MOL/HR		2.607		7.745
TEMPERATURE, C	500.000	80.000	80.000	25.000
PRESSURE, KPA	20.000	20.000	20.000	20.000
COLD SIDE CONDITIONS				
	INLET	OUTLET	INLET	OUTLET
COOLING WATER, KG/HR	29195.594	29195.594	13681.613	13681.613
TEMPERATURE, C	20.000	40.000	16.000	24.000
I				
SIMULATION SCIENCES INC.		R	PAGE P-5	
PROJECT	PRO/II VERSION 8.0 ELEC U6.6			
PROBLEM	OUTPUT			
	HEAT EXCHANGER SUMMARY		12/08/09	

Çizelge A.5: Yoğunlaştırıcılar için simülasyon sonuçları (Devam).

STREAM ID	AKIM3	AKIM4	S4	S7
NAME	Piroliz Sonucu Olusan Gazlar	Yogunlasmaya n Gazlar		
PHASE	VAPOR	VAPOR	MIXED	MIXED
THERMO ID	SRK01	SRK01	SRK01	SRK01
FLUID RATES, KG/HR				
1 TOLUENE	689.0517	689.3155	689.0517	689.3155
2 BENZENE	187.7224	187.8115	187.7224	187.8115
3 OXYLENE	150.1779	150.1146	150.1779	150.1146
4 STYRENE	132.5099	132.2759	132.5099	132.2759
5 EBENZENE	75.0890	75.1297	75.0890	75.1297
6 1T4H	112.6335	112.4177	112.6335	112.4177
7 CO2	123.6760	123.7419	123.6760	123.7419
8 CO	15.4595	15.4322	15.4595	15.4322
9 H2	46.3785	46.4026	46.3785	46.4026
10 METHANE	30.9190	30.9351	30.9190	30.9351
11 ETHANE	26.5020	26.5158	26.5020	26.5158
12 ETHYLENE	24.5143	24.5283	24.5143	24.5283
13 PROPANE	17.8888	17.8976	17.8888	17.8976
14 PROPENE	15.9012	15.9101	15.9012	15.9101
15 BUTANE	3.9753	3.9767	3.9753	3.9767
16 1BUTENE	15.4595	15.4675	15.4595	15.4675
17 12BD	15.0178	15.0266	15.0178	15.0266
18 HDECANE	525.6228	0.0000	525.6228	0.0000
TOTAL RATE, KG/HR	2208.4991	1682.8992	2208.4991	1682.8992
TEMPERATURE, C	500.0000	80.0000	80.0000	25.0000
PRESSURE, KPA	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000
ENTHALPY, M*KJ/HR	3.3912	0.8660	0.9464	0.4077
MOLECULAR WEIGHT	46.0859	36.7844	46.0859	36.7844
WEIGHT FRAC VAPOR	1.0000	1.0000	0.7445	0.5536
WEIGHT FRAC LIQUID	0.0000	0.0000	0.2555	0.4464

EK A.3 : Proses Ekipman Tablosu, Proses Akım Tablosu ve Servis Akımları Tablosu

Çizelge A.6: Piroliz model tesisi için ekipman tablosu.

Kuleler	T-101		T-102	
Sıcaklık (°C)	80		25	
Basınç (kPa)	20		20	
İç Kısım	Soğutucu Borular		Soğutucu Borular	
Konum	Dikey		Dikey	
Malzeme	Karbon Çelik (KÇ)		KÇ	
Boyut				
Uzunluk (m)	5		5	
Çap (m)	2		2	
Pompalar ve	P-101	P-102	P-103	C-101
Debi (kg/h)	525,6	1350,11	333,36	333,36
Akışkan Yoğunluğu (kg/m³)	810,93	859,03	0,086	0,086
Güç (Şaft) (kW)	0,02	0,05	4	52,24
Tip	Santrifüj	Santrifüj	Vakum	Santrifüj
Verim	0,75	0,75	0,75	0,85
Malzeme	KÇ	KÇ	SS 316	KÇ
Giriş Sıcaklığı (°C)	80	25	25	25
Basınç (giriş) (kPa)	20	20	101,325	20
Basınç (çıkış) (kPa)	101,325	101,325	20	101,325

Çizelge A.6: Piroliz model tesisi için ekipman tablosu (Devam).

Tanklar	TK-101	TK-102
Sıcaklık (°C)	25	25
Basınç (kPa)	101,325	101,325
Konum	Dikey	Dikey
Malzeme	Karbon Çelik	Karbon Çelik
Boyut		
Yükseklik (m)	4	4
Çap (m)	8	8
Ateşlemeli Isıtıcı	H-101	
Emilen Isı (MJ/h)	32310	
Isıtıcı Akışkan	Eriyik Tuz	

Çizelge A.7: Atık lastik pirolizi model tesisi için akım bilgileri.

Akım Numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sıcaklık	25	500	500	80	80	80	25	25	25	25	195,8
Basınç (kPa)	20	20	20	20	20	101,325	20	101,325	101,325	20	101,325
Buhar Oranı	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1
Kütle Akışı (kg/h)	3731,5	1523	2208,5	1682,9	525,6	525,6	333,36	1350,11	1350,11	333,36	333,36
Mol Akışı (kmol/h)	-	-	46,34	43,84	2,5	2,5	31,2	12,64	12,64	31,2	31,2
Bileşim, Ağırlık %'si											
Limonen	0	0	21	27,57	0	0	0	34,4434	34,4434	0	0
Toluen	0	0	10,2	13,39	0	0	0	16,7282	16,7282	0	0
Benzen	0	0	8,5	11,16	0	0	0	13,9423	0,139423	0	0
Ksilen	0	0	6,8	8,92	0	0	0	11,1438	11,1438	0	0
Stiren	0	0	6	7,86	0	0	0	9,8196	9,8196	0	0
Etilbenzen	0	0	3,4	4,4643	0	0	0	5,5773	5,5773	0	0

Çizelge A.7: Atık lastik pirolizi model tesisi için akım bilgileri (Devam).

Akım Numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sıcaklık	25	500	500	80	80	80	25	25	25	25	195,8
Basınç (kPa)	20	20	20	20	20	101,325	20	101,325	101,325	20	101,325
Buhar Oranı	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1
Kütle Akışı (kg/h)	3731,5	1523	2208,5	1682,9	525,6	525,6	333,36	1350,11	1350,11	333,36	333,36
Mol Akışı (kmol/h)	-	-	46,34	43,84	2,5	2,5	31,2	12,64	12,64	31,2	31,2
Bileşim, Ağırlık %'si											
Dimetilsiklohekzen	0	0	2,55	3,34	0	0	0	4,1727	4,1727	0	0
1-etil-3-metilbenzen	0	0	2,55	3,34	0	0	0	4,1727	4,1727	0	0
Heptadekan	0	0	15,3	0	64,28	64,28	0	0	0	0	0
Trimetilnaftalen	0	0	8,5	0	35,72	35,72	0	0	0	0	0
Karbon Dioksit	0	0	5,6	7,3529	0	0	36,8461	0	0	36,8461	36,8461
Karbon Monoksit	0	0	0,7	0,917	0	0	4,5952	0	0	4,5952	4,5952

Çizelge A.7: Atık lastik pirolizi model tesisi için akım bilgileri (Devam).

Akım Numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sıcaklık	25	500	500	80	80	80	25	25	25	25	195,8
Basınç (kPa)	20	20	20	20	20	101,325	20	101,325	101,325	20	101,325
Buhar Oranı	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1
Kütle Akışı (kg/h)	3731,5	1523	2208,5	1682,9	525,6	525,6	333,36	1350,11	1350,11	333,36	333,36
Mol Akışı (kmol/h)	-	-	46,34	43,84	2,5	2,5	31,2	12,64	12,64	31,2	31,2
Bileşim, Ağırlık %'si											
Hidrojen	0	0	2,1	2,7573	0	0	13,8171	0	0	13,8171	13,8171
Metan	0	0	1,4	1,8382	0	0	9,2114	0	0	9,2114	9,2114
Etan	0	0	1,2	1,5756	0	0	7,8955	0	0	7,8955	7,8955
Eten	0	0	1,11	1,4575	0	0	7,3037	0	0	7,3037	7,3037
Propan	0	0	0,81	1,0635	0	0	5,3293	0	0	5,3293	5,3293
Propen	0	0	0,72	0,9454	0	0	4,7375	0	0	4,7375	4,7375
Bütan	0	0	0,18	0,2363	0	0	1,1841	0	0	1,1841	1,1841
Büten	0	0	0,7	0,9191	0	0	4,6057	0	0	4,6057	4,6057
Bütadien	0	0	0,68	0,8929	0	0	4,4744	0	0	4,4744	4,4744

Çizelge A.7: Atık lastik pirolizi model tesisi için akım bilgileri (Devam).

Akım Numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sıcaklık	25	500	500	80	80	80	25	25	25	25	195,8
Basınç (kPa)	20	20	20	20	20	101,325	20	101,325	101,325	20	101,325
Buhar Oranı	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1
Kütle Akışı (kg/h)	3731,5	1523	2208,5	1682,9	525,6	525,6	333,36	1350,11	1350,11	333,36	333,36
Mol Akışı (kmol/h)	-	-	46,34	43,84	2,5	2,5	31,2	12,64	12,64	31,2	31,2
Bileşim, Ağırlık %'si											
Karbon Siyahı	0	82	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Çelik	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Atık Lastik	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Çizelge A.8: Servis akımları tablosu ve elektrik tüketimi.

Servis Akımı	Soğutma Suyu	Soğutma Suyu	Eriyik Tuz	Elektrik
Ekipman	T-101	T-102	H-101	Tüm Proses
Giriş Sıcaklığı (°C)	20	16	260	-
Çıkış Sıcaklığı (°C)	40	24	530	-
Akış (ton/h)	29,8	21,3	32,5	-
Tüketim (kW)	-	-	-	400

ÖZGEÇMİŞ



Onursal Yakaboylu, 1986 yılında Eskişehir’de doğdu. 2003 yılında Eskişehir Anadolu Lisesi’nden mezun oldu. 2003 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Kimya Mühendisliği bölümüne girdi. 2008 yılında Kimya Mühendisi unvanı ile mezun oldu. 2008 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Yüksek Lisans programına girdi ve halen eğitimini sürdürmektedir. Haziran – Temmuz 2008 ayları arasında Hint bilim adamı Dr. C. K. Gupta ile beraber İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi’nde ulusal bir madencilik firmasının bir projesinde yer almış ve yüksek lisans eğitimi ile beraber de Ağustos 2008 – Eylül 2009 boyunca atık yönetimine ilişkin projeler gerçekleştiren bir KOBİ’de Ar-Ge mühendisi olarak görev yapmıştır. O. Yakaboylu’nun gerçekleştirmiş olduğu yayınları ve bilimsel etkinlikleri görevleri aşağıda verilmiştir:

ULUSAL BİLDİRİLER

1. ***Yakaboylu, O.***, İşler, A., “İkinci ve Üçüncü Kuşak Biyoyakıtlar ve Dönüşüm Teknolojileri”, Uluslararası Katılımlı 1. Temiz Enerji Kurultayı ve 1. Temiz Enerji Gençlik Kurultayı, Ankara, 15-17 Ekim 2008.

ULUSLARARASI BİLDİRİLER

1. ***Yakaboylu, O.***, İşler, A., Karaosmanoğlu, F., “Waste Tire to Energy Management”, International Waste to Energy Symposium, 12-13 Kasım 2009, İstanbul

BİLİMSEL ETKİNLİKLERDEKİ GÖREVLER

1. “31st International Association for Energy Economics Conference: Bridging Energy Supply and Demand: Logistics, Competition and Environment”, İstanbul, 18-20 Haziran, Öğrenci Komitesi Üyeliği.