



**T.C.**

**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEKSTİL ATIKLARINDAN PİROLİZ YÖNTEMİ  
İLE ENERJİ ELDE EDİLMESİ**

**SİBEL BARIŞÇI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE  
2011**



**T.C.**

**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEKSTİL ATIKLARINDAN PİROLİZ YÖNTEMİ  
İLE ENERJİ ELDE EDİLMESİ**

**SİBEL BARIŞÇI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE  
2011  
DANIŞMANI  
YRD.DOÇ.DR. M. SALİM ÖNCEL**

## ÖZET

# TEZİN BAŞLIĞI: TEKSTİL ATIKLARINDAN PİROLİZ YÖNTEMİ İLE ENERJİ ELDE EDİLMESİ

**YAZAR ADI: SİBEL BARIŞÇI**

Dünya'nın hızla artan enerji ihtiyacı ve buna karşılık yeterli olmayan birincil enerji kaynakları, araştırmacıları yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde çalışmaya yöneltmiştir. Piroliz de bu yöntemlerden birisidir. Petrol rezervlerinin tükeneceği göz önüne alınırsa piroliz yöntemi oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, önemli enerji potansiyeline sahip tekstil atıkları ele alınarak; bu atıklardan piroliz; diğer bir deyişle termal ısıtma metodu ile sentetik sıvı yakıt üretimi amaçlanmıştır. Sıvı ürün veriminin en yüksek olduğu optimum sıcaklığın ve koşulların bulunabilmesi için farklı koşullarda deneyler gerçekleştirilmiştir.

Günümüzün bir diğer problemi de küresel ısınmadır. Alternatif enerji kaynaklarının yenilenebilir olmasının yanında çevre dostu olması da oldukça önemlidir. Çevresel performans açısından bakıldığında piroliz yöntemi çok fazla emisyonu sebebiyet vermemektedir. Bu nedenle tercih edilebilir bir yöntem olduğu görülmektedir.

Çalışmada deneyler 450, 500, 550 ve 600 °C sıcaklık ortamlarında; katalizörlü ve katalizörsüz olmak üzere tekrarlanmıştır. Katalizör olarak  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ve  $\text{CaCO}_3$  kullanılmıştır. Sonuç olarak 500 °C sıcaklıkta ve  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ortamında yapılan deneyde en yüksek sıvı ürün verimine ulaşılmıştır. Sıvı ürün incelenmiş olup; petrol türevi olduğu ve sentetik sıvı yakıt olarak kullanılabilceği görülmüştür.

## **SUMMARY**

### **TITLE OF THE THESIS: OBTAINING ENERGY FROM TEXTILE WASTES BY USING PYROLYSIS METHOD**

**AUTHOR: SİBEL BARIŞCI**

The world's rapidly increasing energy needs and whereas the primary energy sources are not enough, the researchers led to work on new and renewable energy resources. Pyrolysis is the one of these methods too. If it is considered that oil reserves will be run out pyrolysis method is fairly important.

In this study textile wastes which have very important energy potential were examined. From these wastes by using pyrolysis in other words thermal heating method, synthetic liquid fuel is to be aimed. Experiments carried out in different conditions to find optimal heating value and the highest yield of liquid products.

Another today's problem is global warming. It's very important that alternative energy sources are renewable and also environmentally friendly. Pyrolysis method in terms of environmental performance does not lead too much emission. For this reason this method is preferable.

In the study, the experiments are made in the heating values of 450, 500, 550 and 600 oC and are also made with catalyzer and without catalyzer. Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> and CaCO<sub>3</sub> are used as catalyzer. As a result the highest yield of liquid product to be obtained in 500 oC heating value and with Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. This liquid product was examined and were found that is equivalent to petroleum and it can be used synthetic liquid fuel.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamda her türlü desteğini benden esirgemeyen ve değerli zamanını bana ayıran danışman hocam Çevre Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Yrd. Doç. Dr. Salim Öncel'e,

Çalışmam sırasında yardımlarıyla bana destek olan Çevre Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Dr. Mahir İnce'ye,

Deneylein yapılmasında bana her zaman yardımcı olan Çevre Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans Öğrencisi arkadaşlarım Neslihan Erdem ve Didem Ekinci'ye

Ve her zaman yanımda olan, eğitim hayatım süresince bana maddi ve manevi destek veren aileme en içten duygularıyla teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xi
1.GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Anlam ve Önemi	1
2. KATI ATIK BERTARAF YÖNTEMLERİ	4
2.1 Düzenli Depolama	4
2.2 Kompostlaştırma	5
2.3 Termal Teknolojiler	7
2.3.1 Piroliz	7
2.3.1.1 Torrefaksiyon	8
2.3.1.2 Yavaş Piroliz	9
2.3.1.3 Hızlı Piroliz	9
2.3.2 Piroliz Süresince Meydana Gelen Kimyasal Mekanizmalar	10
2.3.2.1 Piroliz Degredasyon (Parçalanma) Mekanizması	10
2.3.2.2 Rastgele Ayrılma	10
2.3.2.3 Yan Gruba Ayrılma	11
2.3.2.4 Monomer Dönüşümü	11
2.3.2.5 Sentetik Polimerler	12
2.3.3 Gazifikasyon	14
2.3.4 Yakma	14
2.3.4.1 Toplu Yakma	15
2.3.4.2 Refused Derived Yakıt(RDF)	15
2.3.4.3 Akışkan Yatak	15
2.3.5 Plazma Teknolojisi	15

2.3.6 Piroliz, Yakma ve Gazifikasyonun Karşılaştırılması	17
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	18
4. TEKSTİL SANAYİ VE TEKSTİL ATIKLARI	23
4.1. Dünya'da Tekstil Ticareti	23
4.1.1 Teknik Tekstil Kavramı	23
4.2 Türkiye'de Tekstil Sanayi	24
4.3. Tekstil Atıkları	25
4.4 Tekstil Liflerinin Termal Özellikleri	26
4.5 Tekstillerin Yanma Mekanizması	28
5. MATERYAL VE METOT	32
5.1. Kullanılan Numunenin Özellikleri ve Numunenin Hazırlanması	32
5.1.1 Numunenin Kalorifik Değeri ve Numune Hazırlanması	33
5.2. Kullanılan Kimyasallar	35
5.3. Kullanılan Cihazlar ve Düzenekler	35
5.3.1 Piroliz Ünitesi	35
5.3.2 Soğutma Düzeneği	36
5.4 Deneysel Çalışmalar ve Numunenin Pirolizi	38
6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	40
6.1 Sıcaklığın Piroliz Ürün Verimlerine Etkisi	40
6.2 Katalizörün Piroliz Ürün Verimlerine Etkisi	42
6.3. Piroliz Sıvısının Kimyasal Bileşimi	46
6.3.1 Benzoik Asit	47
6.3.2 Furan ( Furfural)	47
6.3.3 Benzen	47
6.3.4 Piridin	48
6.3.5 Hekzan	48
6.3.6 Siklo Pentan	48
6.3.7 Propil Benzoat	48
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR	52
ÖZGEÇMİŞ	54

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A.B.D	Amerika Birleşik Devletleri
AB	Avrupa Birliği
PVC	Polivinilklorür
RDF	Refused Derived Yakıt
ROC	Renewables Obligation Certificate
GCV	Brüt Kalorifik Değer
KOBİ	Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmeler
T <sub>g</sub>	Camsı Geçiş Sıcaklığı
T <sub>m</sub>	Erime Sıcaklığı
T <sub>p</sub>	Piroliz Sıcaklığı
T <sub>c</sub>	Yanma Sıcaklığı
T <sub>pc</sub>	Kritik Piroliz Sıcaklığı
T <sub>si</sub>	Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı
$\Delta H$	Yanma Entalpisi
H <sub>f</sub>	Entalpi
LOI	Sınırlayıcı Oksijen Endeksi
AR-GE	Araştırma Geliştirme

# ŞEKİLLER DİZİNİ

<b><u>Şekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1 Düzenli Depolama Sahası Kesiti	5
2.2 Kompostlaştırma Kesiti	6
2.3 Polietilenin Hidrokarbonlara Ayrılması	11
2.4 Polietilende Zincir Ayrılması	11
2.5 Polietilende Beta Ayrılması	11
2.6 Monomer Dönüşümü	12
2.7 Polimerlerin Sınıflandırılması	13
2.8 Plazma Torçu Çalışma Sistemi	16
3.1 Defne Atıklarında Sıcaklığın Piroliz Ürün Verimlerine Etkisi	20
4.1 Selüloz Liflerinin Geri Besleme ile Piroliz ve Yanma Mekanizması	30
4.2 Pamuk Liflerinde Piroliz Sonucu Açığa Çıkan Ürünler	31
5.1 Çalışmada Kullanılan Tekstil Atıklarının Görünümü	32
5.2 IKA C200 Kalorimetre Cihazı	34
5.3 Kalorifik Değer Hesaplamada Kullanılan 0,302 Gram Numune	34
5.4 Piroliz Ünitesi	35
5.5 Ev Tipi Tüp ve Silindirik Levha	36
5.6 Soğutma Düzeneği ve Soklet Ekstraktörleri	37
5.7 Piroliz Düzeneği Akım Şeması	39
6.1 Piroliz Sıcaklığının Ürün Verimlerine Etkisi	42
6.2 Katalizör Kullanımının Ürün Verimlerine Etkisi	45
6.3 Piroliz Sıvı Ürününün Analiz Sonuçları ve Konsantrasyonları	46
7.1 Piroliz, Yakma ve gazifikasyon Proseslerinin Değişik Kombinasyonlarının Çevresel Performansı	48

## TABLOLAR DİZİNİ

<b><u>Tablo</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
1.1 Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Üretilen Elektriğin Brüt Tüketim İçindeki Payına İlişkin AB Ülkelerinin 2010 Yılı Milli Hedefleri	3
3.1 Defne Atığının Farklı Parçacık Boyutundaki Deneysel Sonuçları	20
4.1 Dünya'daki Teknik Tekstil Tüketim Miktarları	24
4.2 Bazı Liflerin Termal Özellikleri	28
5.1 Çeşitli Yakıtların Ortalama Kalorifik Değerleri	33
6.1 450 °C Sıcaklıkta Piroliz Ürün Verimleri	40
6.2 500 °C Sıcaklıkta Piroliz Ürün Verimleri	40
6.3 550 °C Sıcaklıkta Piroliz Ürün Verimleri	41
6.4 600 °C Sıcaklıkta Piroliz Ürün Verimleri	41
6.5 450 °C'de Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> Kullanılarak Yapılan Deney Sonuçları	42
6.6 450 °C'de CaCO <sub>3</sub> Kullanılarak Yapılan Deney Sonuçları	43
6.7 500 °C'de Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> Kullanılarak Yapılan Deney Sonuçları	43
6.8 500 °C'de CaCO <sub>3</sub> Kullanılarak Yapılan Deney Sonuçları	43
6.9 550 °C'de Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> Kullanılarak Yapılan Deney Sonuçları	44
6.10 550 °C'de CaCO <sub>3</sub> Kullanılarak Yapılan Deney Sonuçları	44
6.11 600 °C'de Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> Kullanılarak Yapılan Deney Sonuçları	44
6.12 600 °C'de CaCO <sub>3</sub> Kullanılarak Yapılan Deney Sonuçları	45

# 1.GİRİŞ

## 1.1 Çalışmanın Anlam ve Önemi

Artan nüfus, şehirleşme, sanayileşme, teknolojinin yaygınlaşması ve refah düzeyindeki artışa paralel olarak tüketimin aşırı derecede artması sonucunda atık çeşitliliğinin ve miktarının da artması kaçınılmazdır. Geçmişte hemen hemen bütün kentsel atıklar (geri dönüşüm ve kompostlaştırmadan sonra kalan atıklar da dahil olmak üzere) işlenmeden düzenli depolamaya gönderilmekteydi. Günümüzde Avrupa düzenli depolama yönetmeliği deponi sahalarına gönderilen biyolojik olarak ayrışabilen atıkların azaltılması gerektiğini belirtmektedir. Şimdiye kadar düzenli depolamaya en büyük alternatif atıkların toplu yakılması olarak düşünülmüştür. Fakat birçok örgüt ve kuruluş atıkların yakılmasına karşı çıkmaktadırlar. Çünkü yakma; doğal kaynakları yok etmekte, devamlı atık akışı ihtiyacından dolayı geri dönüşüm oranını azaltmakta, emisyonlardan ve toksik küllerden dolayı hava kirliliğine ve iklim değişikliklerine yol açmaktadır (Defra, 2007). Bu yüzden otoriteler diğer seçenekleri gözden geçirmeye başlamışlardır ki bu seçenekler piroliz, gazifikasyon ve plasma teknolojileridir.

Dünya nüfusunun sürekli artmasıyla birlikte; sanayileşme ve kentleşme nedeniyle enerjiye olan talep her yıl % 1,6 oranında artmaktadır. Bunun sonucu olarak fosil yakıtların sınırlı olan kaynaklarının tükeneceği endişesi de bilim adamlarını yeni enerji kaynakları konusunda araştırmalar yapmaya yöneltmiştir. Ancak dünyadaki enerji talebinin % 90'ı fosil yakıtlardan karşılanmakta; bu kaynakların da sınırlı ve belli bir coğrafyaya dağılmış olması ülkeleri enerji darboğazına sokmaktadır (Defra,2007).

Uluslararası Enerji Ajansı'nın 2004 verilerine göre dünyada bilinen petrol rezervlerinin ömrü 50 yıl, doğal gazın 60 yıl, kömürün ise 227 yıl olarak tahmin edilmektedir. Bu nedenle günümüzde enerji üretiminde sürekliliğin sağlanabilmesi için, enerji kaynaklarının çeşitliliğinin yaratılması ve alternatif enerji kaynaklarının hayata geçirilmesi gerekmektedir.

Fosil kaynakların bugün olduğu gibi gelecek yıllarda da dünya birincil enerji üretimindeki belirleyici konumlarını sürdürecekleri tahmin edilmektedir. 2030 yılında petrolün payı % 35, doğal gazın % 28,5 olacağı hesaplanmaktadır.

ABD ve Avrupa ülkeleri başta olmak üzere gelişmiş dünya ülkeleri alternatif enerji konusundaki çalışmalara hız vermişler ve bu konudaki araştırma-geliştirme çalışmaları için milyonlarca dolar ayırmışlardır. Araştırmacılar bu konuda yaptıkları çalışmalarda özellikle dört hususun göz önünde bulundurulması gerektiğini belirtmektedirler. Bunlar; üretilen enerjinin ekonomik olması, çevreye en az seviyede zarar vermesi, uzun vadede enerji açığını kapatması ve ülkeyi enerji açısından dışa bağımlılıktan kurtarmasıdır (Grohmann, et al.,1990).

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de artan nüfus, sanayinin gelişmesi ve teknolojinin ilerlemesiyle enerji ihtiyacı hızla artmakta ve var olan üretim, tüketimi karşılamada yetersiz kalmaktadır. Bu durum sağlıklı bir enerji politikası oluşturulmasının, kaynakların verimli ve bilinçli kullanılmasının önemini vurgulamaktadır. Bunun yanında ülkemizde mevcut bulunan güneş, rüzgar, biyokütle, jeotermal enerji gibi kaynakların devlet tarafından teşvik edilerek kullanımı yaygınlaştırılmalıdır. Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının maliyetleri düşük olmasa da önümüzdeki yıllarda düşmesi beklenmektedir.

Dünyanın en önemli çevresel sorunu olan küresel ısınmanın başlıca kaynağı bilindiği gibi fosil yakıtların aşırı tüketimidir. Katı fosil yakıtların yakılmasıyla büyük miktarda atmosfere yayılan CO<sub>2</sub>, sera gazlarının en önemlisidir. Son 50 yılda atmosferdeki CO<sub>2</sub> seviyesi hızla yükselmektedir. Sera gazları yeryüzüne ulaşan güneş ışınlarının geri yansımalarını geciktirerek sera etkisi yaratmakta ve atmosferde ortalama sıcaklığın artmasına neden olmaktadır. Bunun sonucu olarak; açığa çıkan sera gazları küresel ısınmaya dolayısıyla, buzulların erimesine ve iklim değişikliklerine neden olmaktadır. Yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının küresel ısınmaya çözüm olabileceği düşünülmektedir. AB ülkeleri bu konuda çalışmalara devam etmektedirler (Tablo 1.1).

Tablo 1.1 Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin bürüt tüketim içindeki payına ilişkin AB ülkelerinin 2010 yılı milli hedefleri.

Ülkeler	1997 Yeşil Enerji Üretimi(%)	2010(%)
İsveç	9,1	60,0
Portekiz	38,5	39,0
Avusturya	70,0	78,1
Finlandiya	24,7	31,5
İspanya	19,9	29,4
Danimarka	8,7	29,0
İtalya	16,0	25,0
Fransa	15,0	25,0
Yunanistan	8,6	20,1
İrlanda	3,6	13,2
Almanya	4,5	12,5
İngiltere	1,7	10,0

Tablo 1.1’de görüldüğü üzere tüm AB ülkeleri enerji üretimi içindeki yeşil enerjinin payını arttırmayı taahhüt etmektedir (Lokurlu, 2006). Yenilenebilir enerji kaynaklarından biyokütlenin yeri ve önemi gittikçe artmaktadır. Basit olarak biyokütle türleri dört temel grupta toplanmaktadır. Bunlar; odunsu bitkiler, tarımsal biyokütle, sulu biyokütle ve endüstriyel atık kaynaklı biyokütledir. Endüstriyel atık kaynaklı biyokütleler genel olarak gıda ve endüstriyel amaçlar için kullanılan hammadde atıklarıdır. Endüstriyel atıklar organik temele dayandığı için daha ziyade biyogaz üretimine elverişlidir. Biyokütleden geleneksel olarak doğrudan yakılarak enerjiye dönüştürülmesi dışında, çeşitli termokimyasal prosesler uygulanarak daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip ürünler elde edilmektedir. Buradan elde edilen ürünlerin (katı, sıvı ve gaz) ham biyokütleye göre taşınma kolaylığı, daha az kül içeriği, kullanım kolaylığı ve daha az yer kaplaması gibi büyük avantajları vardır. Biyokütleye uygulanan termal prosesler; doğrudan yakma, gazifikasyon, piroliz gibi yöntemlerdir (Taner, 1990).

## 2. KATI ATIK BERTARAF YÖNTEMLERİ

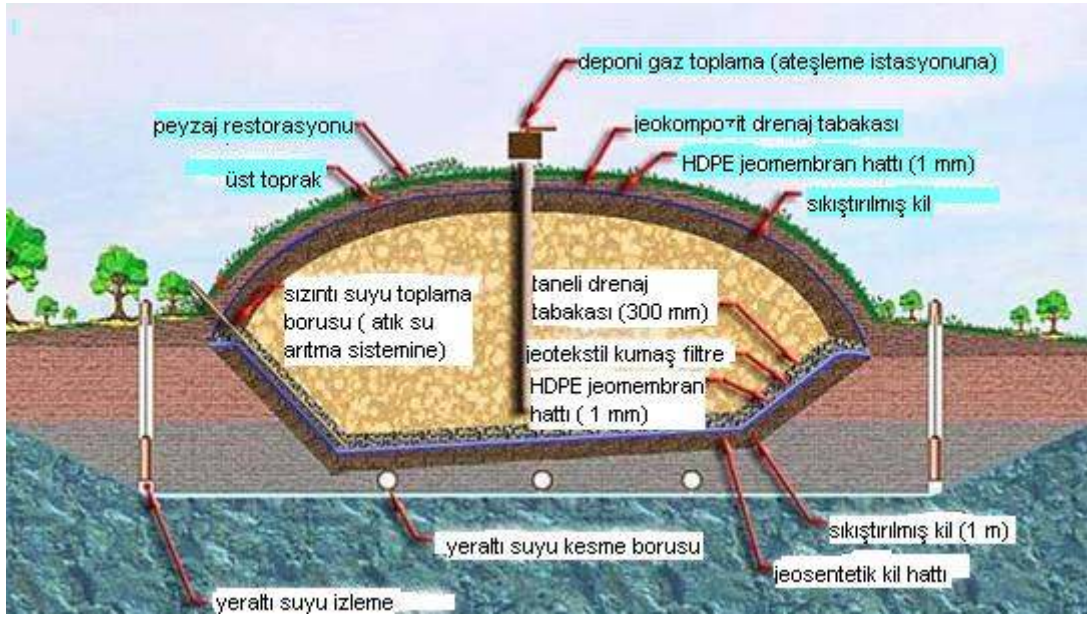
Katı atıklar, üreticisi tarafından daha fazla istenmeyen, artık gereksinim duyulmayan katı haldeki malzemeler olarak tanımlanabilir. Katı atıklar insanın her türlü faaliyeti sonucunda, günlük yaşamda, ticarete, endüstride ve diğer faaliyetler sonucunda ortaya çıkmaktadır. Katı atıkların çevreye ve insanlara zarar vermeyecek şekilde toplanıp, taşınması, bilimsel esaslara ve mühendislik sanatına uygun şekilde bertaraf edilmesi gerekir. Fakat katı atıkların bertarafından önce atık minimizasyonu, geri kazanım veya geri dönüşüm gibi yeniden değerlendirme imkanlarının araştırılması önemlidir. Bu, kısaca atık yönetimi olarak adlandırılır. Katı atık yönetiminde, katı atıkların üretimi, özellikleri, karakterizasyonu, geri dönüşüm ve geri kazanım süreçleri, geçici olarak depolanması, taşınması ve bertaraf edilmesi ele alınmaktadır. Bilimsel esaslara ve mühendislik prensiplerine göre işleme tabi tutulmayan katı atıklar çevrede pek çok kirlenme problemine sebebiyet vermektedir. Katı atık bertarafında üç temel yöntem söz konusudur. Bunlar; düzenli depolama, kompostlaştırma ve termal teknolojiler olarak adlandırılmaktadır.

### 2.1 Düzenli Depolama

Düzenli depolama katı atıkların çevre sağlığına uygun bir şekilde tabanı kil ve geomembranla (plastik pestille) geçirimsiz hale getirilmiş bir araziye dökülüp sıkıştırılması ve üzerinin toprakla örtülmesini, içinde metan bulunan depo gazının uygun bacalarla kontrol edilerek toplanmasını ifade eder (Borat, 1999).

Düzenli deponun projesi hazırlanırken depo dolduktan sonra üzerinin nasıl örtülüp yeşillendirileceği baştan planlanır. Depo sahasının görünüş olarak çevreyi rahatsız edici olmaması, keza arazinin tekrar kullanılabilir hale getirilmesi için yeşillendirilmesi, ağaçlandırılması, deponun üzerine tarım toprağı serpilmesi gerekmektedir. Nihai örtü tabakası ile kapatıldıktan sonra düzenli deponun üzeri daha sonraki kullanım amacına göre hazırlanmalıdır. Düzenli depolama yerleri üzerine bina yapımına izin verilmez. Ancak zemindeki oturmalara karşı koyabilecek nitelikte ahşap

veya uygun malzemeden baraka veya büfe gibi yapılar inşa edilebilir (Borat, 1999). Modern düzenli depolama kesiti Şekil 2.1'de görülmektedir.



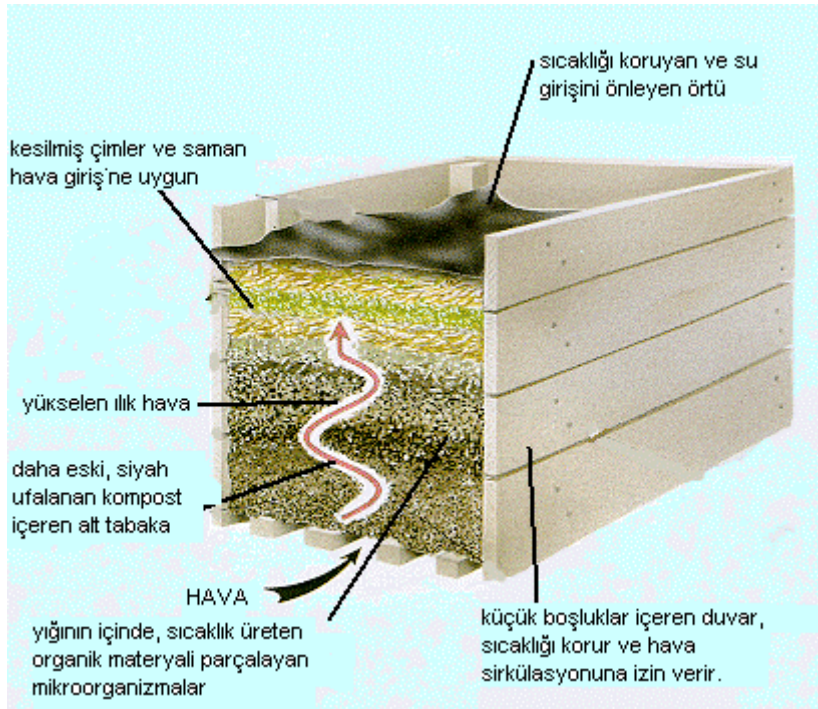
Şekil 2.1 Düzenli depolama sahası kesiti (Valerius, 2006)

## 2.2 Kompostlaştırma

Kompostlaştırma, katı atık organik bileşenlerinin özellikle mutfak ve bahçe atıklarının kontrol edilen şartlar altında biyolojik ayrışması şeklinde tarif edilebilir (Borat, 1999). Gerçekte kompostlaştırmada atık maddeler tam stabil hale getirilmeden kısmen stabil halde tutulurlar. Başka bir deyişle organik maddelerin tamamen ayrışıp mineralleşmesine izin verilmez ve kompostun daha sonra kullanılacağı toprakta bir organik madde kaynağı olması sağlanır. Genellikle mutfak ve bahçe artıkları kompostlaşabilirler. Kompostlaştırma ile organik katı atıklar toprak şartlandırıcısı olarak kullanılan ve humusa benzeyen yarı kararlı bir ürüne dönüştürülürler.

Kompostlaştırma diğer bir deyişle geri dönüşümün doğal yöntemidir. Üç tip kompostlaştırma söz konusudur. Aerobik kompostlaştırma; hava kullanımını ifade eder. Yüksek nitrojen içeren atıklar (çim artıkları ve diğer yeşil malzemeler gibi) sıcaklığın yükselmesini sağlayan bakterileri üretirler. Bu sistemde havanın sistemde tutulması ve sıcaklığın yüksek seviyede (160 °C'den fazla) kalması önemlidir. Bu yöntem geniş hacimlerdeki kompost olabilen atıklar için uygundur. Anaerobik kompostlaştırma ise

havasız ortamda gerçekleştirilir. Burada basitçe kompost olabilecek maddeler yığın halinde birkaç yıl bekletilir. Bu yöntemde hava kullanımına ihtiyacı olmayan bakteriler çok yavaş bir şekilde çalışmaktadırlar. Anaerobik kompostlaştırmada bakteriler organik materyali amonyak ve metana dönüştürdüğünden kötü koku ortaya çıkmaktadır. Diğer bir yöntem ise solucan kompostlaştırma (vermicomposting) yöntemidir. Bu sistem yiyecek atıklarından yararlanmak için en uygun sistemdir. Burada kırmızı solucanlar geniş bir kutuya yerleştirilir ve diğer bakterileri, yiyecek atıklarını, mantarları yiyerek yüksek değerde kompost üretirler. Oksijen ve nemin ortamda tutulması gereklidir. Bu tip kompostlaştırmada solucanların hasat için kullanılacak maddeyi üretmeleri 3-4 ay sürmektedir ( US Environmental Protection Agency). Tipik bir kompostlaştırma kesiti Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2 Kompostlaştırma kesiti (EPA)

Kompostlaştırmada etkili olanlar bakteri, mantar, aktinomiset (mantar gibi dallı miselyumu olan bakteri) ve protozoa gibi mikroorganizmalardır.

Ortalama 1 ton evsel etiktan 300-400 kg. kompost, 150 kg. su buharı ve diğer gazlar ile 450-550 kg. miktarında düzenli depolamaya gitmesi gereken atık elde edilir (Borat, 1999). Kompostlaştırmayı sadece ekonomik değer taşıyan bir katı atık bertaraf etme metodu olarak değil, bunun

yanında araziye gömülmesi gereken çöpleri yaklaşık 1/2 oranında azaltan bir yöntem olarak görmek gerekir. yabancı kaynak ekle. kesit ekle.

## 2.3 Termal Teknolojiler

Katı atık yönetiminde bu teknolojiler, katı atıkların hem hacminin azaltılması hem de enerji kazanımları nedeniyle önemli bir basamaktır. Katı atıkların termal prosesleri enerji kazanımıyla birlikte; katı atıkların gaz, sıvı ve katı ürünlere dönüşmesi olarak tanımlanabilir. Bu sistemler hava gereksinimlerine göre sınıflara ayrılır.

### 2.3.1 Piroliz

Piroliz basit söylemle sadece termal enerji kullanılarak kimyasal bağların parçalanması olayıdır. Analitik piroliz moleküllerin piroliz sırasındaki davranışlarını gözlemleyerek ya da moleküller arası bağların parçalanmasını inceleyerek yapılan bir çalışma tekniğidir (Wampler, 2007). Bu proseslerin analizi daha çok, daha büyük orijinal moleküllerin kimliği ve doğası hakkında bilgi verir. Piroliz sırasında meydana gelen parçalanma kütle spektrumu sırasında meydana gelen sürece benzerdir. Enerji sisteme girer ve sonuç olarak molekül stabil parçalara ayrılır. Eğer enerji parametreleri (sıcaklık, ısıtma oranı ve zaman) tekrarlanabilir bir şekilde kontrol edilirse parçalanma, orijinal molekülün karakteristiğidir.

Piroliz, kullanılan hammaddenin tamamıyla oksijensiz ortamda ısı bozundurulmasıdır. Reaksiyon parametrelerine ve çeşitli piroliz metotlarına bağlı olarak sıvı, gaz ve katı ürünler elde edilir.

Piroliz, kok kömürü üretimi için yüzyıllardır kullanılmaktadır. Yüksek verimde katı ürün elde etmek için düşük sıcaklıklarda yavaş reaksiyon gerekmektedir (McKendry, 2002).

Isıl dönüşüm süreçlerinden olan pirolizden elde edilen birincil ürünler doğrudan kullanılabilmesi gibi kimyasal işlemler uygulanarak yüksek kalitede ve değerinde yakıt veya kimyasal ürünlere dönüştürülebilir.

Piroliz diğer ısıl dönüşüm süreçlerine göre tercih edilmektedir. Bunun nedeni, kullanımı zor ve masraflı olan katı biyokütle ve atıkları sıvı ürünlere dönüştürebilmektedir. Elde edilen sıvı ürün, üretimi ve pazarlanması

sırasında taşıma ve depolama maliyetlerinin düşük olması, yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmaları nedeniyledir. Sıvı elementel bileşiminde biyokütleyle benzer ve oksitlenmiş hidrokarbonların çok karmaşık şekillerini içermektedir. Özellikle yavaş piroliz süreçlerinden elde edilen sıvı ürün yakıt yerine kullanılabilir niteliktedir.

Piroliz proseslerinde elde edilen katı ürün gelişmiş ülkelerde metalürji ve mobilya endüstrilerinde bugün sınırlı da olsa kullanılmaktadır.

Piroliz ürün verimlerine etki eden en önemli parametreler; sıcaklık, basınç, tanecik büyüklüğü ve ısıtma hızıdır (Tezçakar, 2008). Sıcaklığın yüksek olması ve reaktörde kalış süresinin uzun olması gaz verimini artırır. Sıvı ürün veriminin artması içinse daha düşük sıcaklık ve kısa alıkonma süresi gerekmektedir. Genelde reaktörde kalış süresi 30-60 dakika olarak farklı miktarlarda olmaktadır.

Piroliz çalışmaları son yıllarda çevre mühendisliğinde organik kökenli katı atıkların bertarafında da yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle kullanılmış otomobil lastiklerinin, organik evsel atıkların, organik kökenli arıtma çamurlarının vb. bertarafında örnekleri görülmektedir. bu çalışmanın konusunu oluşturan tekstil atıklarının piroliz yöntemiyle bertarafı literatürde az sayıda rastlanmakla birlikte yakın gelecekte yaygın olarak kullanılabilceğini akla getirmektedir.

Üç çeşit piroliz vardır. Bunlar; torrefaksiyon, hızlı piroliz ve yavaş pirolizdir.

### **2.3.1.1 Torrefaksiyon**

Torrefaksiyon, oksijensiz ortamda ılımlı piroliz anlamında kullanılmaktadır. Örneğin odun biyokütlesinin pirolizi dört karakteristik bölgeye ayrılmaktadır. Birinci bölge 200 °C' ye kadar olan sıcaklık bölgesi olup, burada su, CO<sub>2</sub>, formik asit ve asetik asit açığa çıkar. ikinci bölge 200-280 °C sıcaklık bölgesi olup; su buharı, formik asit, asetik asit, bir miktar CO ve glikoz açığa çıkar. Üçüncü bölge 280-500 °C arasında olup yoğun bir ekzotermik reaksiyon başlar. Dördüncü bölge 500 °C'nin üstü olup burada reaksiyonlar yoğun bir şekilde devam eder. Torrefaksiyon bölgesi ikinci bölgedir ve sadece uçucu bazı organik maddelerin uzaklaştırılmasını

ve reaktif hemiselüloz fraksiyonunun bozunmasını içerir (Üçgöl, 2010). Biyokütlenin karbon içeriği ve kalori değeri artar, kuruma işlemi gerçekleşir.

Bu proses, gazlaştırma öncesi biyokütlenin enerji yoğunluğunu arttırmada önemli bir aşamadır.

### **2.3.1.2 Yavaş Piroliz**

Odun, turba, maden kömürü gibi organik maddeler havasız ortamda ve sabit yatak reaktörlerde 300 °C civarındaki sıcaklıklarda, uzun ısıtma zamanlarında katı ve sıvı ürünlere dönüştürülürler. Elde edilen katı son ürün karbon bakımından zengindir. Gaz ürün ise yanabilen hidrojen, karbonmonoksit, metan ve düşük molekül ağırlığa sahip hidrokarbonlardan oluşmaktadır. Yavaş pirolizde, hızlı pirolize göre katı ürün verimi daha yüksektir (yaklaşık % 40). Fakat elde edilen gaz ve sıvı ürün verimi daha az ve daha düşük enerjili olmaktadır. Ayrıca yavaş pirolizin ilk yatırım maliyeti hızlı pirolize göre daha düşük olmaktadır. (Brown et.al, 2010).

### **2.3.1.3 Hızlı Piroliz**

Hızlı piroliz ile biyokütle, yüksek sıcaklıkta ve akışkan yatak reaktörlerde hızla gazlaştırılır. Oluşan gaz reaksiyon sisteminden hızla uzaklaştırılır ve soğutulur. Soğuyan gaz yoğunlaşarak katranımsı bir sıvı oluşturur. Bu sıvı fenol ve furfural türevlerince zengindir (Üçgöl, 2010).

Biyokütleden en fazla sıvı ürün elde etmek hızlı pirolizin temel amacıdır. Yüksek verim için hızlı ısıtma, reaktörde oluşan gazın kısa alıkonma zamanı ve yoğunlaşabilen gazın hızlıca soğutulması esastır. Hızlı ısıtma ile kömürleşme önlenir. Bunun için de biyokütlenin tanecik boyutunun olabildiğince küçük olması gerekir. Gaz oluşumundan sonra soğutmaya kadar geçen zaman daha başka yan reaksiyonları önlemek için oldukça az olmalıdır. Hızlı soğutma ile de kondenzasyon reaksiyonlarının önüne geçilir.

## **2.3.2 Piroliz Süresince Meydana Gelen Kimyasal Mekanizmalar**

Piroliz biyokütlenin ısıyla ve oksijen yokluğunda parçalanması olayıdır. Bu parçalanma sonucunda katı, sıvı ve gaz ürünler meydana gelmektedir. Bu bölümde katı, sıvı ve gaz ürünlerin oluşum mekanizmaları ve kimyasal reaksiyonlar incelenecektir.

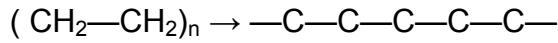
### **2.3.2.1 Piroliz Degradasyon (Parçalanma) Mekanizması**

Piroliz boyunca meydana gelen moleküllerin parçalanması olayı serbest radikallerin üretimi ve kimyasal bağların ayrılmasıyla oluşmaktadır. Bu moleküllerin davranışlarını anlatmak için kullanılan genel proses serbest radikallerin degradasyon mekanizmasını temel almaktadır (Wampler, 2007). Piroliz boyunca molekül parçalarının davranışı ve üretilen parçaların kimliği malzemenin içerdiği kimyasal bağların tipine bağlıdır. Eğer ana molekül karbon zincirinden oluşuyorsa, birçok sentetik polimerde bulunduğu gibi, zincirin ana moleküle kimyasal olarak benzeyen daha küçük moleküllere rasgele ayrılması beklenebilir. Bu spesifik daha küçük moleküller makromoleküler yapı hakkında direkt ipuçları verir. Geleneksel degradasyon mekanizması genel olarak makromoleküllerin pirolitik davranışını anlatır.

### **2.3.2.2 Rasgele Ayrılma**

Sentetik moleküllerin karbon omurgasının daha küçük moleküllere dağılımı gibi uzun zincirli moleküllerin parçalara ayrılması rasgele ayrılma olarak tanımlanır (Wampler, 2007). Eğer bütün C—C bağları aynı dayanıklılıkta ise birinin diğerinden daha fazla kırılması için bir sebep yoktur. Sonuç olarak polimer parçaları küçük moleküllerin oluşturduğu geniş tabakalar oluşturur. Poliolefinler bu şekilde davranan maddelere iyi bir örnektir. Şekil 2.3'de Polietilenin, piroliz için yeteri kadar ısıtıldığında, herhangi bir sayıda karbon içerebilen hidrokarbonlara ayrıldığı görülmektedir. Metan, etan, propan gibi. Daha sonra zincir ayrılması gerçekleşir ve bunun sonucunda; en sonunda serbest radikal bulunan hidrokarbonları üretir (Şekil 2.4). Eğer serbest radikal komşu molekülden

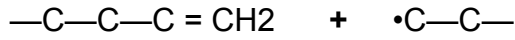
hidrojen atomunu ayırırsa doymunluğa ulaşır ve komşu moleküldeki bir başka serbest radikali oluşturur. Ki bu bir çok şekilde stabilize edilebilir. Bunların en çok bilineni beta ayrılmasıdır (Şekil 2.5). Bu proses doymun ve bir çift bağa sahip hidrokarbon moleküllerinin oluşumuyla devam eder.



Şekil 2.3. Polietilenin hidrokarbonlara ayrılması



Şekil 2.4. Polietilende zincir ayrılması



Şekil 2.5. Polietilende beta ayrılması

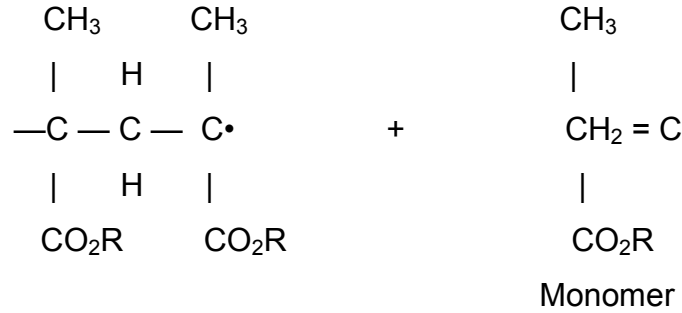
### 2.3.2.3 Yan Gruba Ayrılma

Zincir boyunca birbirine bağlanarak polimer molekülünün iskeletini oluşturan atomlar dizisine ana zincir denir. Polimer ana zincirinde yer alan atomlara yan grup denilen bazı kimyasal birimler bağlanmıştır. Örneğin polietilenin ana zincirini karbon atomları oluştururken, yan grupların tamamı hidrojen atomudur. Polietilende gözleendiği gibi yan grupları benzer olan polimer sayısı çok değildir, çoğu polimer yan grupları farklı monomerlerden sentezlenir. Polistrende hidrojen yanında fenil, poli vinil klorürde klor, polipropilende metil yan grupları vardır.

Polivinil klorür (PVC) piroliz edildiğinde; oligomerik herhangi bir kalıp oluşmaz. Rasgele ayrılmada üretilen klorlu hidrokarbon yerine, PVC aromatikleri, özellikle benzen, toluen ve naftalin üretir. Bu polimer zincirinden HCl'nin ayrılmasıyla başlayan iki adım degradasyon mekanizmasının bir sonucudur.

### 2.3.2.4 Monomer Dönüşümü

Üçüncü piroliz davranışı polimetil metakrilat gibi polimerlerle açıklanmıştır. Metakrilat polimerlerinin yapısından dolayı tercih edilen degradasyon öncelikli olarak monomer dönüşümüdür (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Monomer dönüşümü

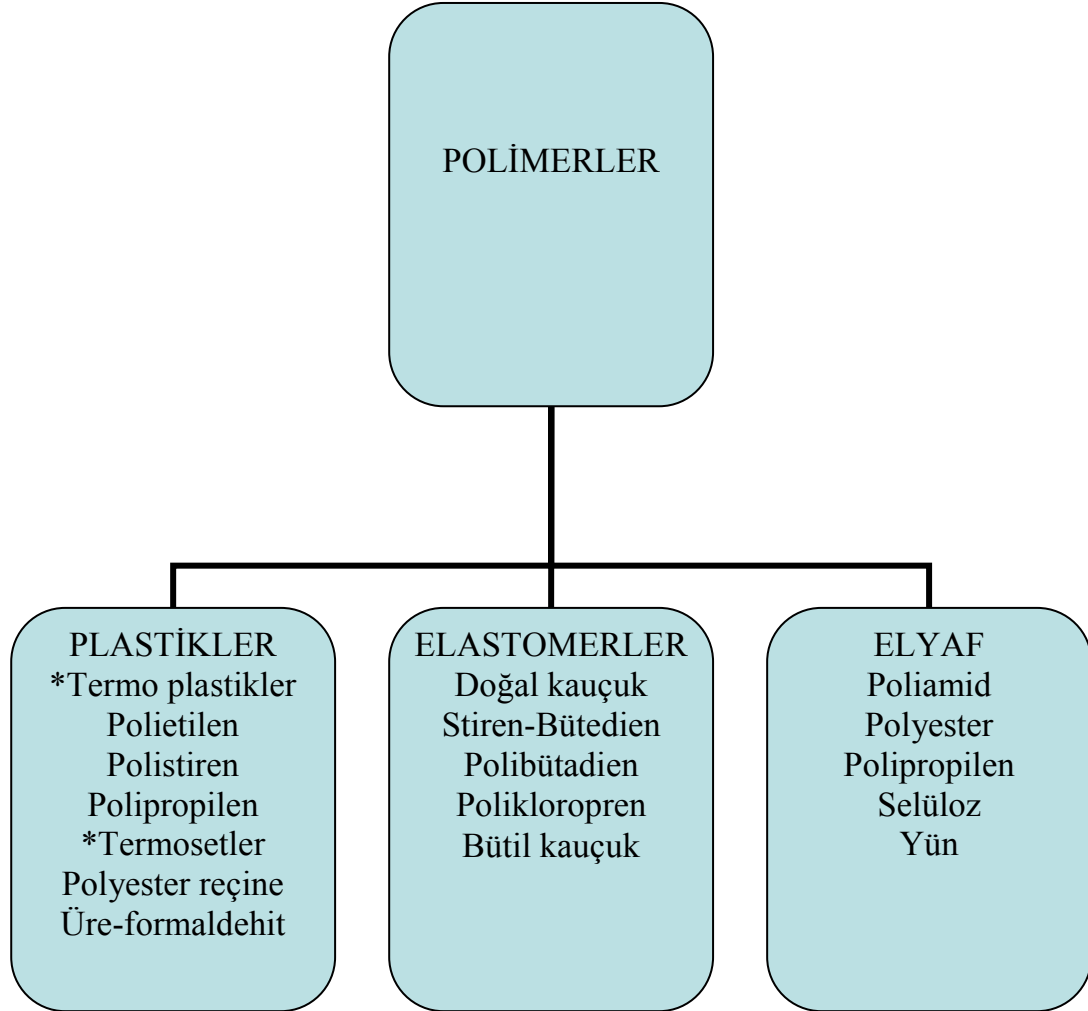
Monomer üretimi R grubu tarafından etkilenmeyen bölümdür. Bu nedenle polimetil metakrilat, metil metakrilata dönecek, polietil metakrilat da etil metakrilat üretecektir. Bu kopolimerlerde olduğu gibi takriben orijinal polimerizasyon oranında her iki monomerin üretimiyle devam edecektir.

### 2.3.2.5 Sentetik Polimerler

Analitik pirolizin sıklıkla, ilk bakışta oldukça sınırlı görünen, polimerlerin analizi için uygulanan bir teknik olduğu düşünülmektedir. Bununla beraber doğal ve sentetik polimerler ki bunlar her gün karşılaştığımız plastik şişeler ve torbalar, odun ürünleri, tekstil lifleri, kağıt ve karbonlar, boyalar, deriler, cilalar gibi formlarda olabilir. Aslında bir odaya oturup polimer olmayan bir şeye (kitaplar, perde, halı, telefon vb.) dokunmak oldukça zordur. Sonuç olarak piroliz kullanılarak yapılan çalışmalar oldukça geniş alanlara yayılmaktadır. Belki de en geniş analitik piroliz uygulaması sentetik polimerlerin analizindedir (Wampler, 2007).

Suya dirençli materyaller olarak bilinen polimerler ve polimer esaslı malzemeler kauçuk, deri, ipek, pamuk ve selüloz gibi doğal kaynaklı olabildiği gibi; plastik, elastomer, fiber, tekstil ve benzeri materyaller gibi sentetik olarak da kullanım amacına göre günlük hayatta yerini almaktadır. Şekil 2.7'de polimerlerin nasıl sınıflandırıldığı gösterilmiştir. Bu kadar geniş

kullanım alanı olan bir maddenin bertaraf problemi olması beklenir ki polimerlerin çoğu biyobozunur değildir ve bertaraf problemi ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.7 Polimerlerin Sınıflandırılması

Polimerlerin en çok kullanıldığı alanlardan biri de tekstil endüstrisidir. Tekstil endüstrisi lif halinde kullanılabilecek polimerlerin son ürüne dönüştürüldüğü en önemli endüstri dalıdır. Sentetik polimerler genellikle kaplama maddesi olarak kullanılırlar. Taşıyıcı bir zemin üzerine kaplama maddesi şeklinde sürülerek kullanılırlar. Kaplama ve laminasyon tekstiller tipik dokuma, örme ve dokusuz yüzey yapısındaki kumaşların sentetik ve doğal polimer maddelerin esnek filmleri ile ince film kombinasyonlu tekstil yüzeylerini içermektedirler. Kaplama kumaşlar ayrıca, genellikle çeşitli viskoz sıvı polimerlerin tekstil yüzeyine uygulanmasını içerir. Yapılan bu tez

çalışmasında, içeriğinde polimer bulunan tekstil liflerinin oluşturduğu kumaş parçaları incelenmiştir. Bu kumaş parçalarının enerji potansiyeli araştırılıp, en uygun piroliz koşulları araştırılmıştır.

### 2.3.3 Gazifikasyon

Gazifikasyon, materyallerin yanma meydana gelmeyecek miktarda oksijene maruz bırakıldığı bir prosestir. Sıcaklıklar genellikle 750 °C'den yüksektir (Slater, 2008). Bazı sistemlerde piroliz evresini gazifikasyon aşaması takip eder. Bu atıklardan salınan gazların daha fazla enerji taşınması içindir. Gazifikasyon ve aynı zamanda pirolizin en önemli ürünü yüksek oranda karbonmonoksit ve hidrojen (%85) içeren, çok daha az miktarlarda karbondioksit, nitrojen, metan ve çeşitli hidrokarbon gazlarını içeren gaz bileşimidir. Bu gaz bileşimi kalorifik değere sahiptir ve böylece petrokimya endüstrilerinde, rafinerilerde kimyasal hammadde olarak ya da elektrik üretmek için yakıt olarak kullanılabilirler. Ayrıca yakıt üniteleri için gerekli hidrojen akışını üretmek için de kullanılabilirler. Bu gaz bileşiminin kalorifik değeri giren atığın kompozisyonuna bağlı olacaktır.

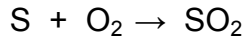
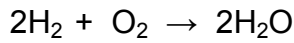
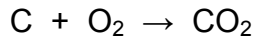
Genellikle piroliz ve gazifikasyon prosesleri dört basamaktan oluşur:

1. Atık hammaddenin hazırlanması: Öncelikle kalorifik değeri olmayan maddelerin ve geri dönüşebilir materyalin ayrılması.
2. Atığın Isıtılması: Düşük oksijen ortamında yağ, gaz ve kül üretimi.
3. Gazın Temizlenmesi: Bazı partiküllerin ve hidrokarbonların giderimi.
4. Temizlenmiş gazın kullanımıyla elektrik enerjisi ve bazı durumlarda ısı enerjisi elde edilmesi (Slater, 2008).

### 2.3.4 Yakma

Katı atık hacminin azaltılması için toplanan katı atıkların özel tesislerde hava verilerek termal prosese tabi tutulmaları yakma işlemidir. Genellikle sıcak yanma gazları ve yanmayan kısım (kül) son ürünlerdir. Diğer bir deyişle yanma, bileşenlerin yanması veya oksitlenmesi anlamına gelmektedir. Hidrokarbonların yanması; ısı, ışık, su ve karbondioksit üretir. Kül, tam olarak yanmamış maddelerin ve oksitlenme sırasında ortaya çıkan

yeni katı maddelerin birleşmesiyle oluşur. Yanmada olabilecek temel reaksiyonlar şunlardır:



#### **2.3.4.1. Toplu Yakma**

Atıklar doğrudan yakılır. Yanma sırasında ortaya çıkan ısı genellikle bir elektrik jeneratörüne bağlı türbini çalıştırmak için suyun buhara çevrilmesinde kullanılır.

#### **2.3.4.2. Refuse-Derived Yakıt (RDF)**

Doğrudan yakılmadan önce karışık atıklar bir dizi işlemde geçer. Bu işlemlerin seviyesi tesisten tesise değişmekle beraber genellikle maddelerin parçalanması ve metallere ve diğer düşük enerji içeren maddelerin ayrıştırılması söz konusudur. İşlenmiş maddeler daha sonra ya toplu yakma tesislerinde ya da çimento fabrikaları gibi halihazırda mevcut bulunan tesislerde yakıt olarak kullanılırlar.

#### **2.3.4.3. Akışkan Yatak**

Akışkan yatak sisteminde, toz haline getirilmiş katı atıklar yanma kazanının içine akıtılır ve kazanın altından üflenen havada asılı halde iken, havanın sağladığı oksijenle yakılır. Tanecikler küçük olduğu için daha iyi yanma sağlanır. Hava akımının hızını da kömürün akış hızına göre ayarlanır.

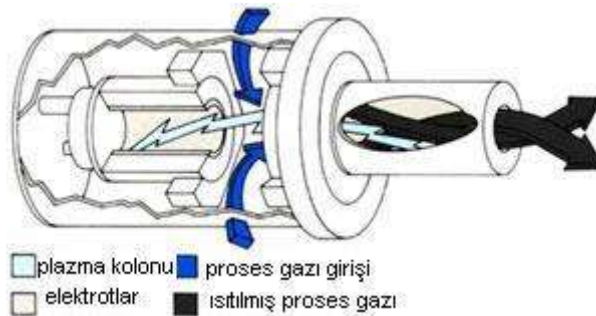
Çıkan yanma gazlarının kazandan bir kez daha geçirilmesi suretiyle karbonmonoksitin tümüyle karbondioksit'e dönüşmesi sağlanabilir.

#### **2.3.5 Plazma Teknolojisi**

Plazma teknolojisi, atık bertarafında güvenli ve tamamen çevre dostu bir yöntemdir. Bu teknoloji ile atık türleri ayrıştırılmış veya karışık katı, sıvı veya gaz her türlü atık bertaraf edilebilir.

Plazma teknolojisi sisteminde atıklar doğrudan reaktörün üst kısmına gönderilir ve haznede biriktirilir. Haznedeki plazma torçları ( Şekil 2.8) 2700-

4500 °C sıcaklık oluşturur. Buraya dökülen organik malzeme, bu kadar yüksek sıcaklıkta oksijen olmadığından ötürü yanmaz ve moleküllerine ayrılır. Böylelikle içeriğinde esas olarak CO, H, ve N bulunan bir gaz karışımı elde edilir. Bu sıcak gaz karışımı atıkların içinden reaktörün üst bölümünde biriktirilir. Yukarı çıkan gaz, ısı ile birlikte içinden geçtiği organik atıklarda da gaz çıkışına neden olur. Esasen, konveyörden hazneye dökülen atıklar, haznenin dibine eriştiğinde muazzam ısı ile birlikte oksijensiz ortamda gaz haline gelmektedir. Düşük oksijen oranı ve yüksek sıcaklık nedeniyle gaz içerisinde furan ve dioksin oluşamaz. Reaktörden alınan gaz bir dizi gaz işleme tesisinden geçirilir ve soğutulur. Bu temiz gaz bir buhar türbinine verilerek elektrik elde edilir. Plazma torçu'nun ürettiği yüksek ısı ile toprak, cam, silis v.b bütün inorganik malzeme eritilir. Ergimiş metal ve cam hazne altından magma halinde ( yaklaşık 1700 °C'de) dışarı alınır. Dökme esnasında magmanın su ile soğutulması sonucu metaller ayrılabilir. Dolayısıyla bu ısıl işlem sonucunda hiçbir atık ortaya çıkmaz. Tüm atık cama veya gaza dönüştürülür. Ortaya çıkan tek atık, asfalt yapımında da kullanılan cam cürufudur. ( Lewis, 2010).



Şekil 2.8 Plazma torçu çalışma sistemi ( Lewis, 2010)

Gaz soğutulurken içeriğindeki zararlı maddelerin yaklaşık %85'i çevrime yeniden dahil edilerek dönüştürülür. Nihayetinde kalan partiküller ise ergimiş magmanın içerisine dahil edilir. Cam cürufu geçirimsiz olduğundan, bu son derece zehirli atıklar cam cürufunun içine hapsedilir. Bilindiği üzere cam, içerisinde son derece zehirli maddeler bulunan ancak geçirimsiz olmasından ötürü çevreye ve insan sağlığına hiçbir zararı olmayan çevre dostu bir maddedir.

### **2.3.6 Piroлиз, Yakma ve Gazifikasyon Teknolojilerinin Karşılaştırılması**

Piroлиз ve gazifikasyon teknolojilerinin geleneksel yakma metoduna göre birçok önemli avantajı vardır.

1. Düşük oksijen kullanımıyla daha az emisyon
2. Oluşan gazlar kontaminatları gidermek için temizlendiğinden emisyonların kontrolü daha kolaydır.
3. Sistemin oluşturulması daha çabuk olur.
4. Bu prosesler yakma yöntemine göre daha yararlı ürünler meydana getirir.
5. Üretilen enerji Renewables Obligation Certificate (ROC)' e göre toplu yakma sistemlerinden daha uygundur.
6. Yakma ünitelerine göre daha küçük ölçeklerde inşa edilebilirler ve daha sonradan ekleme veya çıkarma yapılarak hacimleri kolaylıkla değiştirilebilir (Greenhouse, 2008).

### 3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Katı atıklar çevresel kirlilik yaratmanın yanında insan sağlığını da ciddi anlamda tehdit etmektedirler. Gelişmiş ülkeler katı atıkları bertaraf etme çalışmaları doğrultusunda ar-ge yatırımlarına önemli maddi destek sağlayarak çevresel kirliliği önleme ve ülke ekonomilerine pozitif kazanım sağlama amacıyla geri dönüşüm projelerine önem vermektedirler.

Hızla artan nüfusun, teknolojik yeniliklere bağlı olarak gelişen endüstrinin, enerji gereksinimi karşısında geleneksel enerji kaynaklarının yerine geçebilecek yeni ve yenilenebilir doğal kaynakların araştırılması, bulunması ve bunlardan yararlanılması konusunda dünyada ve ülkemizde önemli çalışmalar yapılmaktadır.

Tarih boyunca biyokütle atıkları enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Ağaç endüstrisi, orman, tekstil, gıda, kağıt üretiminden kaynaklanan atıklar yenilenebilir enerji kaynaklarıdır ve fosil yakıtlara bir alternatif oluşturmaktadır.

Dünya'da fosil yakıtlar(kömür ve petrol) özellikle fiyatlarının düşük olması, kolay bulunabilir ve yüksek enerji içeriğinden dolayı enerji ihtiyacını karşılanmasında tercih nedeni olmuştur. Ancak 1970'lerde başlayan enerji kriziyle, petrol kaynaklarına olan politik ilgi, rekabeti yaratmış ve bunun sonucunda fiyatlar artmıştır. Dünyada çevre bilincinin yaygınlaşması, çevreye zararı olmayan yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeyi sağlamıştır. Çünkü fosil kaynakların kullanımı sonucu, baca gazından çıkan gazlar çevre kirliliğine neden olmaktadır.

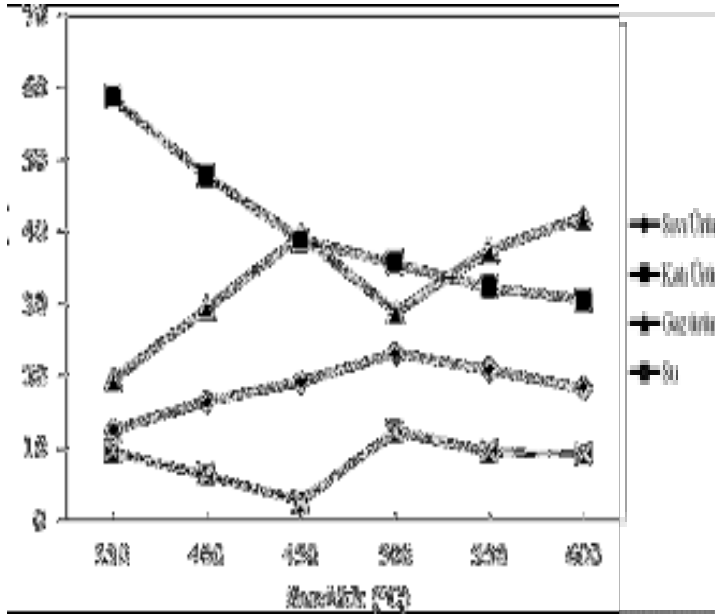
Biyokütleden yakıt ve bazı değerli kimyasallar üretmek için ısı dönüşüm süreçleri uygulanmaktadır. Bu süreçlerin en ekonomik ve verimli olan piroliz, biyokütleden sıvı hidrokarbon üretimi için en uygun olanıdır (Aybar, 1994).

Bu konuda yapılan çalışmalardan biri; Gazi Üniversitesi, Kastamonu Eğitim Fakültesi'nde yapılan 'çay atığının katalitik pirolizi ve sıvı ürün verimine katalizörlerin etkisi' adlı çalışmadır (Çağlar, 2004). Bu çalışmada havada kurutulmuş ve öğütülmüş çay atığı numuneleri farklı miktarlardaki  $K_2CO_3$ ,  $Na_2CO_3$  ve  $ZnCl_2$  katalizörleri ile  $700\text{ }^{\circ}C$  sıcaklıkta katalitik pirolize

tabi tutulmuştur. Sıcaklık 350 °C' den 750 °C'ye kadar arttırıldığında doğrudan piroliz (katalizörsüz) reaksiyonunun verimi %32,3'ten %26,3'e düşmüştür. Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (0.10g) katkısı ile sıvı ürüne dönüşüm verimi %26,1'den %30,2'ye çıkmıştır. Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> katkısının miktarı %10'dan %70'e çıkartıldığında sıvı ürünler %30,2den %27,3'e düşmüştür. K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (0.50g) katkısı ile sıvı ürüne dönüşüm verimi %26,1 den %26,2'ye çıkmıştır. K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> katkısının miktarı %10'dan %70'e çıkartıldığında sıvı ürünler %25,9den %25,1 e düşmüştür. ZnCl<sub>2</sub> (0,10g) katkısı ile sıvı ürüne dönüşüm verimi %26,1 den %26,4 'e çıkmıştır. En yüksek sıvı ürün 700 °C sıcaklıkta 0,10 g ve 0,30 g ZnCl<sub>2</sub> katkılarından %26,4 ve %26 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak bu çalışmada alkali katalizörlerin sıvı ürün verimini arttırıcı yönde etkileri görülmüştür.

Sıcaklığın artmasıyla da gaz ürün veriminde belirgin bir artış gözlenmiştir. Elde edilen sıvı ürünlerin yapısındaki oksijen uzaklaştırıldığında, sıvı ürün daha yüksek enerji değerine sahip olacağından içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılabilir.

Bir diğer çalışma; Aralık 2008'de Kahramanmaraş'ta yapılmıştır. Bu çalışmada ise Hatay uçucu yağ fabrikasından elde edilen defne (*Laurus nobilis* L.) artıkları biyokütle kaynağı olarak seçilmiştir. Defne artıkları sabit yatak reaktörde farklı piroliz sıcaklıklarında (350 °C-600 °C) piroliz edilmiştir. Pirolizi etkileyen faktörlerden, piroliz sıcaklığı ve parçacık boyutunun piroliz ürünleri verimi üzerinde etkileri incelenmiştir. Şekil 3.1'de de görüldüğü üzere maksimum sıvı ürün %23.16 verimle 500°C'de ve 1 Nl/h azot akış hızı altında elde edilmiştir. Ve yine şekil 3.1'e bakıldığında bu sıcaklıktaki katı ürün ve gaz ürün sırasıyla %35.30 ve %28.96 olarak elde edilmiştir. Sıcaklığın artmasıyla piroliz dönüşümü artış göstermiş ve 600°C'de %67.74 olarak bulunmuştur. Sıcaklık artışıyla sıvı ürün verimindeki azalma, yüksek sıcaklıklarda meydana gelen ikincil reaksiyonlar sonucu sıvı ürünlerin gaz ürünlere dönüşmesine atfedilebilir denmiştir (Ertaş ve ark., 2008)



Şekil 3.1 Defne atıklarında sıcaklığın piroliz ürün verimlerine etkisi ( Ertaş ve ark., 2008)

Yine bu çalışmada incelenmiş bir diğer faktör parçacık boyutudur ve 3 farklı boyut incelenmiştir. Bunların 500 °C'de pirolizi sonucu meydana gelen ürünler tablo 3.1'de verilmiştir ve burada görülen sonuç parçacık boyutunun piroliz verimi üzerine fazla bir etkisinin olmadığıdır. Literatürde bir çok piroliz hammaddesi için parçacık boyutu önemli olmasına rağmen defne artığında olmamasının nedeni düşük yığın yoğunluğu ve yüksek oksijen içeriği olabilir.

Tablo 3.1 Defne artığının farklı parçacık boyutundaki deneysel sonuçları (Isıtma hızı: 10 °C/dak, piroliz sıcaklığı: 500 °C, azot akış hızı: 1NL/h, reaksiyon süresi: 30 dak) ( Ertaş ve ark., 2008)

Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü	Katı ürün (%)	Sıvı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1.60>Dp>0.850	64,85	35,15	20,86	32,70
0.850>Dp>0.420	64,47	35,53	23,16	28,96
0.420>Dp>0.250	64,78	35,22	21,27	33,07

Piroliz konusunda yapılmış bir diğer çalışma; Meksika'da Automana de Nuevo Leon Üniversitesi'nde 2007 yılında yapılan 'tekstil atıklarının pirolizi' konulu çalışmadır ( Miranda, et.al, 2007). Burada farklı sıcaklık oranlarında termogravimetri ile tekstil atıklarının termal davranışı çalışılmıştır. Yığın kaybının başladığı sıcaklığın 104-156 °C arasında olduğu ve son reaksiyon sıcaklığının 423-500 °C olduğu görülmüştür. Ortalama yığın kaybı ise %89,5'tir. 135-139, 276-394 ve 374-500 °C sıcaklık aralıklarında üç adet DTG tepesi saptanmıştır. İlk ikisi hemiselüloz ve selülozun parçalanması ile ya da selüloz parçalanmasının farklı prosesleri ile ilgili olabilir. Üçüncü tepe ise muhtemelen sentetik polimer ile ilgilidir. Sonuç olarak laboratuvar ölçekli piroliz testlerinde toplam %74 olmak üzere, %31,5 hafif sıvı ürün, %42,5 ağır sıvı ürün verimi, %12,5 katı ürün ve %13,5 gaz ürün elde edilmiştir.

Bir başka çalışmaya göz atacak olursak; 2008 yılında yapılan Bangladeş'teki atık lastiklerin piroliz kinetiğinin incelendiği çalışmada, bisiklet, motosiklet ve kamyon lastikleri nitrojen atmosferde 30-800 °C'de ve 10-60 °C sıcaklık artışında termogravimetrik olarak incelenmiştir. Sıcaklık arttırıldığında bu üç lastik tipi benzer davranışlar göstermişlerdir. Toplam ağırlık kaybı yüzdesi kamyon lastiği atıkları için daha yüksek, bisiklet lastiği atıkları için daha düşük bulunmuştur. Kamyon lastiği atıklarının pirolizi bisiklet lastiği ve motosiklet lastiği atıklarından daha kolay olduğu görülmüştür. Ayrıca motosiklet lastiği atıklarının kısmen daha zor olduğu da belirtilmiştir. Bütün örnekler için DTA eğrileri göstermiştir ki; degradasyon reaksiyonları üç temel ekzoterm ve bir endotermden oluşmaktadır ( Islam, et. al, 2008).

Sonuçlar incelendiğinde; lastik atıkları çok az oranda nem ve küçük miktarda kül içermektedir. Kül içeriği araba ve kamyon lastiği atıklarına göre, bisiklet ve motosiklet lastiği atıklarında daha fazladır. Kül içeriğindeki bu varyasyon kauçuk lastiğin içerdiği inorganik materyalin varyasyonundan dolayıdır. Oksijen içeriği çalışılan atık lastiklerde özellikle yüksek değildir; atık lastikler için brüt kalorifik değer (GCV) 28-40 Mj/kg'dır. Fuel yakıtlarda GCV değeri 40-44 Mj/kg'dır. Ayrıca atık lastikler için GCV odun biyokütlelerin yaklaşık iki katıdır (19-20 Mj/kg). Atık lastiklerin uçucu madde içeriği ise nispeten yüksektir. Bütün bu veriler atık lastiklerin potansiyel bir enerji kaynağı olduğunu göstermektedir. Atık lastiklerin bu karakteristikleri

göz önüne alındığında, piroliz yoluyla sıvı ürün üretimi atık lastiklerden faydalanmak için etkili bir metottur. ( Islam, et.al, 2008).

Bir diğer çalışmada ise fındık kabukları, fındık ağacı parçaları, zeytin kabukları, kayısı ve şeftali çekirdeklerinin hızlı pirolizi ve piroliz-gazlaştırma denemeleri pilot ölçekli deney düzeneğinde yapılmıştır. Piroliz sıcaklığı 450 °C de sıvı ürün verimleri ağırlıkça % 17-19, % 20-22 su, % 25-27 gaz, % 34-36 katı ürün verimleri elde edilmiştir. Piroliz-gazlaştırma deneylerinde yaklaşık hidrojen/karbonmonoksit oranı 3 olduğunda hidrojen zengin sentetik gaz yakıt üretilebileceği gösterilmiştir ( Lucchesi, et.al., 1988).

Hajaligol ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, selülozun hızlı pirolizinde sıcaklığın, ısıtma hızının ve katı ürünün reaktörde kalış süresinin piroliz ürün verimlerine, bileşimlerine ve ürünlerin oluşum hızlarına etkisi incelenmiştir. Sıcaklığın ve reaktörde kalış süresinin artmasıyla ikincil kırılma yani degradasyon olaylarının arttığı gözlemlenmiştir ( Hajaligol, et.al, 1982).

## 4. TEKSTİL SANAYİ ve TEKSTİL ATIKLARI

### 4.1 Dünya'da Tekstil Ticareti

Tekstil sanayi, imalat sanayi içerisinde en uzun ve kompleks endüstriyel zincirlerden bir tanesidir. Giyim, endüstriyel kullanım ve ev tekstilleri olmak üzere üç temel nihai kullanım alanında doğan bir talebe sahip olan; KOBİ'lerin hakim olduğu ve alt sektörlere parçalanmış heterojen bir sektördür.

Tekstil ve konfeksiyon sanayisi dünyadaki en eski ekonomik faaliyetlerden biridir. Yazılı tarihten önceki dönemlerde bile çok basit anlamda tekstil ürünleri kullanılmaktaydı. Tekstil tarihinin başlangıcının taş devrine dayandığı söylenebilir. Kumaşın hayvan postunun yerini almasından beri tekstil, ekonomi tarihinde rol oynayan ana etkenlerden ve en eski insan uğraşlarından biri olmuştur.

Dokumacılıkta elle üretimin yerini makinenin alması ilk defa İngiltere'de sanayi devrimiyle gerçekleşmiştir. İngiltere'de başlayan sanayi devrimi daha sonra Amerika'ya sıçramış, pamuklu çırçırılama makinesinin icadı ile pamuk üretiminin ve pamuklu dokuma sanayinin gelişmesi sağlanmıştır.

18. yüzyılın ortalarında başlayan ve 19. yüzyılda giderek artan makineleşme uygulamaları ile hızla gelişen tekstil ve konfeksiyon sanayi 20. yüzyılda bütünüyle mekanik üretim yöntemini uygulayan bir sanayi dalı niteliği kazanmıştır.

Dünya ticaret hacminin % 7'sini oluşturan tekstil ve konfeksiyon sanayi, sağladığı istihdam imkanları ve ihracat gelirleri içerisindeki yüksek payı nedeniyle ekonomik kalkınma sürecinde önemli roller üstlenen bir sanayi dalıdır. 1980'de 55 milyar dolar olan dünya tekstil ve konfeksiyon sanayi ticareti 1997 yılında 155 milyar dolara çıkarak en yüksek düzeyine ulaşmış; Asya krizi sonrasında düşen fiyatların etkisiyle ticaret hacmi 1999'da 148 milyar dolara gerilemiştir.

#### 4.1.1 Teknik Tekstil Kavramı

Teknik tekstil terimi 1980'li yıllarda görünüş ve estetik karakterlerinden önce teknik özellikleri ve performansları için geliştirilen ve çeşitliliği her geçen gün artan ürünler ve üretim tekniklerini tarif etmek üzere

ortaya konmuş bir terimdir. Zira bu hızla büyüyen sahanın zenginliğini, kompleksliliğini ifade etmekte 'endüstriyel tekstil' terimi yetersiz kalınca; onun yerine 'teknik tekstil' terimi geçmiştir (Anonim, 2005).

Teknik tekstil deyince estetik ve dekoratif özelliklerinden ziyade öncelikle teknik performansları fonksiyonel özellikleri için üretilen tekstil malzemeleri ve ürünleri anlaşılmaktadır. Özel olarak tasarlanan, herhangi bir üründe veya proses dahilinde veya yalnız başına belirli bir özelliği yerine getirmek amacıyla kullanılan malzemelere teknik tekstil denmektedir (Anonim, 2005).

Teknik tekstil sözcüğü, günlük yaşamda pek bilinmemesine ve bir çağrışım yapmamasına rağmen, teknik tekstil ürünleri evden otomobile, giyimden tarıma karayolundan hastanelere kadar günlük hayatımızın çeşitli alanlarında yoğun olarak kullanılmaktadır. Tablo 4.1'de teknik testilerin tüketim miktarları gösterilmektedir.

Tablo 4.1 Dünya'daki teknik tekstil tüketim miktarları (1000 ton) (Ilgaz, 2006)

Uygulama Alanları	1995	2000	2005	2010	% Büyüme 1995-2000	% Büyüme 2000-2005	% Büyüme 2005-2010
Jeotekstiller	196	255	319	413	5.4	4.6	5.3
Bina ve inşaat tekstilleri	1261	1648	2033	2591	5.5	4.3	5
Tıp ve hijyen tekstilleri	1228	1543	1928	2380	4.7	4.6	4.3
Endüstriyel tekstiller	1846	2205	2624	3257	3.6	3.5	4.4
Koruyucu tekstiller	184	238	279	340	5.3	3.3	4
Tarım tekstilleri	1173	1381	1615	1958	3.3	3.2	3.9
Paketleme tekstilleri	2189	2552	2990	3606	3.1	3.2	3.8
Spor tekstilleri	841	989	1153	1382	3.3	3.1	3.7
Taşıt tekstilleri	2117	2479	2828	3338	3.2	2.7	3.4
Giyim teknik tekstilleri	1072	1238	1413	1656	2.9	2.7	3.2
Ev teknik tekstilleri	1864	2186	2499	2853	3.2	2.7	2.7
Toplam	13971	16714	19683	23774	3.7	3.3	3.8

## 4.2 Türkiye'de Tekstil Sanayi

Türkiye'de tekstil üretiminin tarihi Osmanlı dönemine uzanmaktadır. 16. ve 17. yüzyılda tekstil üretimi oldukça yaygın ve ileri düzeyde yapılmakta idi. İmparatorluğun son yıllarına kadar sanayinin tekstil üzerine

kurulu olması da sektörün öneminin bir göstergesidir. En temel hammadde pamuğun Türkiye’de önemli miktarda yetiştiriliyor olması izleyen yıllarda ülkede tekstil sektörünün daha da gelişmesine hizmet etmiştir.

Tekstil sektöründe işletmeler genellikle orta büyüklükte örgütlenmiş olup, entegre büyük tesisler de bulunmaktadır. Türkiye genelinde ihracata yönelik üretim yapan 7500 civarında tekstil imalatçısı bulunmaktadır. Tekstil sektörünün genel ihracat içerisindeki payı %11’dir. Bugün 5 milyar dolar değerinde ihracat ile sektör, ekonominin önde gelen bileşenlerinden biri durumundadır.

### 4.3 Tekstil Atıkları

Tekstil fabrikalarından ve atölyelerinden çıkan katı atıklar evsel ve tehlikeli atıklar olarak sınıflandırılabilirler. Evsel atıklar içerisinde; proses aşamasında oluşan hatalı ürünler, giysi üretimi sonucu paketlenen atıkları ve artan kumaş parçaları sayılabilir. Kimyasal madde ve boya kapları, pil, atık yağ, arıtma çamuru, akümülatör, plastikler gibi yan ürünler ise tehlikeli katı atıkları oluşturmaktadır.

Düzenli depolamadan sakınmak için son zamanlarda gösterilen çabalar ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç alternatif katı atık arıtma proseslerine bir fırsat olmuştur. Her yıl Türkiye’de yaklaşık 24 milyon ton kentsel katı atık üretilmektedir ve bu rakamın her yıl artması beklenmektedir. Tekstil atıkları, Türkiye’deki kentsel katı atıkların yaklaşık %2 sini oluşturmaktadır. Önemli bir enerji kaynağı sunması ve materyallerin özellikle pamuklu kumaşlardaki ana selülozik kompozisyon göz önüne alınmasıyla yüksek sıcaklık değerlerine sahip olması bu atıkları değerli kılmaktadır. T-shirt konfeksiyonları boyunca, geri dönüşümü mümkün olmayan farklı renklerdeki küçük tekstil parçaları kalmaktadır. Sonunda bu atıklar düzenli depolamaya gönderilmektedir. Çevre dostu alternatiflerden biri; bu kesilmiş tekstil atıklarının piroliz prosesi ile yararlı ürünlere dönüştürülmesidir ve bu yolla düzenli depolama sahalarına uzaklaştırmaya geçerli bir alternatif sunmaktadır.

Pamuk lifleri, gossypium denilen ebegümecigiller familyasından ve bu bitkinin tohumlarının çevresinde oluşmuş ince tellerden elde edilir. Pamuk

tipik olarak %88-96 oranında selülozdan oluşur, geri kalanı ise protein, parafin ve pektinli maddelerdir. Pamuğun yaklaşık %99 selüloz olarak kalması için ağartılması ve yağının alınması gerekmektedir.

Tekstil lifleri ısıtıldığında, polimer molekülleri piroliz olarak adlandırılan daha küçük moleküllere ayrılmaya başlarlar. Bu piroliz ürünlerinden bazıları benzin türevidir. Farklı polimerlerden meydana gelmiş farklı tekstil lifleri ile elde edilen yakıt tipi ve miktarı da her tekstil tipi için farklıdır. Bu atıkların alternatif yakıt kaynağı oluşturup büyük bir öneme sahip olmasından dolayı piroliz davranışlarının anlaşılması oldukça önemlidir.

#### 4.4 Tekstil Liflerinin Termal Özellikleri

Tekstil liflerin termal özellikleri ve konu ile ilgili bazı tanımlar şu şekildedir:

Camsı geçiş sıcaklığı ( $T_g$ ) : Termoplastik liflerin ilk yumuşama gösterdiği sıcaklık derecesidir. Malzeme ısıtılmaya başlandığında, molekül zincirini oluşturan ünitelerin enerjisi büyür ve bu enerji, molekül zincirini oluşturan ünitelerin hareketini etkiler. Sıcaklığın artması ile bu hareket hızlanır, molekül zincirleri arasındaki bağ kuvvetleri zayıflar ve zincirler birbirlerine göre daha bağımsız hale gelir. Sıcaklığın azalması ile ünitelerin dönme hareketi yavaşlar ve belli bir sıcaklıkta durur. Bu esnada atomların sadece kendi konumları etrafındaki titreşim hareketi kalır. Bu sıcaklığa camsı duruma geçiş (camlaşma) sıcaklığı denir. Malzeme rijit yapıdadır, fakat özgül hacmi artmıştır (Özcan, 2002).

Erime sıcaklığı ( $T_m$ ) : Malzeme ısıtılmaya devam edilirse ünitelerin hızı artar ve molekül zincirleri yavaş yavaş tamamen bağımsız hale gelir. Yani erimeye ve sıvı gibi davranmaya başlar. Erimenin meydana geldiği sıcaklık derecesidir (Özcan, 2002).

Piroliz sıcaklığı ( $T_p$ ) : Malzemeyi oluşturan makromoleküler yapının termal olarak parçalanmaya başladığı sıcaklıktır (Özcan, 2002).

Yanma sıcaklığı ( $T_c$ ) : Piroliz sonucu oluşan yanıcı gazların oksitlendiği ve yanmanın gerçekleştiği sıcaklıktır (Özcan, 2002).

Kritik piroliz sıcaklığı ( $T_{pc}$ ) : Bu sıcaklıkta, artan piroliz hızı ile birlikte açığa çıkan yanıcı gaz karışımı konsantrasyonu da artacağı için, malzeme dışarıdan uygulanan bir kıvılcım ile hemen tutuşacaktır (Özcan, 2002).

Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı ( $T_{si}$ ) : Malzeme ısıtmaya devam edilirse piroliz sonucu ortaya çıkan yanıcı gaz karışımının konsantrasyonu ortamdaki oksijen ile reaksiyona girecek ve bir alev kaynağına gerek olmadan malzeme kendiliğinden tutuşacaktır (Özcan, 2002).

Yanma entalpisi ( $\Delta H$ ) : Yanma işlemi esnasında malzeme ve reaktanlar aynı sıcaklık ve basınçta iken malzemenin entalpisi ile reaktanların entalpisi arasındaki farktır. Yani yanma esnasında açığa çıkan ısıdır (Özcan, 2002).

Entalpi ( $h_f$ ) : 25 °C ve 1 atmosfer (ya da 1 bar) basınç altında bileşiği oluşturan elementlerin açığa çıkardığı ya da emdiği ısıyı gösterir (Özcan, 2002).

Sınırlayıcı oksijen indeksi (LOI) : LOI değeri bir materyalin yanmaya devam etmesi için gereksinim duyduğu % oksijen miktarı anlamına gelmektedir. LOI değeri 25'ten büyük olan materyaller havada genellikle kendiliğinden sönmekte; 25'ten küçük olanlar ise çok kolay yanmaktadırlar (Kutlu, 2002).

Bazı liflere ait bahsedilen bu özellikler yani termal özellikler Tablo 4.2.'de verilmiştir.

Tablo 4.2 Bazı liflerin termal özellikleri (Bajaj, 1998)

Lifler	Termo plastiklik	Camlaşma sıcaklığı T <sub>g</sub> (°C)	Erime sıcaklığı T <sub>m</sub> (°C)	Piroliz sıcaklığı T <sub>p</sub> (°C)	Yanma sıcaklığı T <sub>c</sub> (°C)	Yanma entalpisi ΔH (kJ/g)	Sınır. Oks. İndeksi LOI (%)
Yün	Hayır	-	-	245	600	27	25
Pamuk	Hayır	-	-	350	400	19	18,4
Viskoz	Hayır	-	-	350	420	19	18,9
Triasetat	Evet	172	290	305	540	-	18,4
Nylon 6	Evet	50	215	431	450	39	20-21,5
Nylon 6.6	Evet	50	265	403	530	32	20-21,5
Poliester	Evet	80-90	255	420-477	480	24	20
Akrilik	Evet	100	≥ 220	290	≥ 250	32	18,2
Polipropilen	Evet	-20	165	469	550	44	18,6
Modakrilik	Evet	≤ 80	≥ 240	273	690	-	29-30
PVC	Evet	≤ 80	≥ 180	≥ 180	450	21	37-39
PVDC	Evet	-17	180-210	≥ 220	532	11	60
PFTE	Evet	126	≥ 327	400	560	4	95
Nomeks	Evet	275	375	310	500	30	28,5-30
Kevlar	Evet	340	560	590	≥ 550	-	29
PBI	Evet	≥ 400		≥ 500	≥ 500	-	40-42

## 4.5 Tekstillerin Yanma Mekanizması

Tekstil mamullerinin yanması; ısınma, moleküllerin ayrışması yani piroliz, tutuşma ve alevin yayılmasını kapsayan karmaşık bir olaydır. Bir tekstil mamulünün yanması 4 adımda gerçekleşir. Mamulün ısınması, makromoleküllerin termik parçalanması yani piroliz, tutuşma, yanma ve yanmanın ilerlemesi.

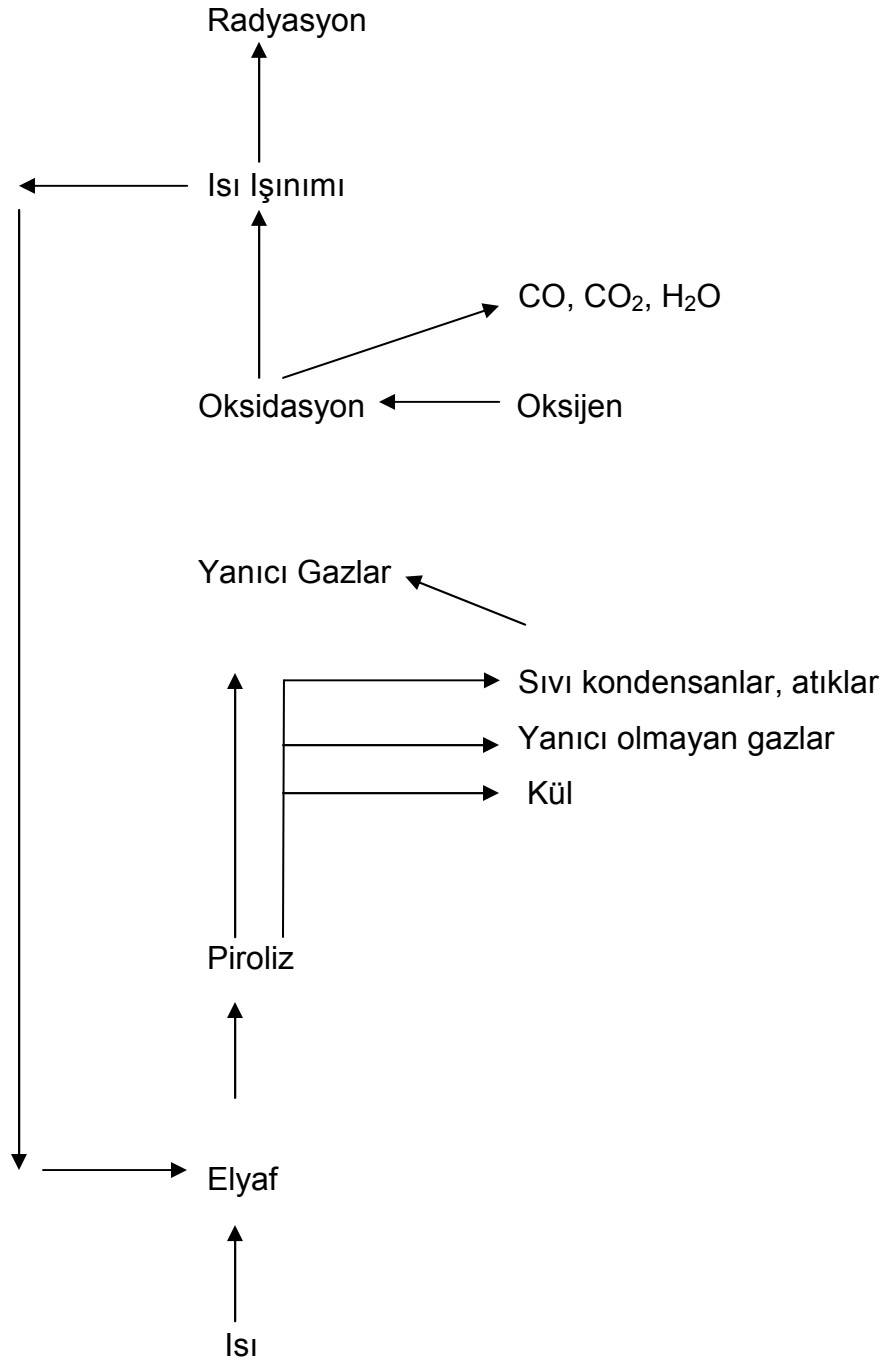
Bir tekstil ürününe belirli bir miktarda ısı verildiğinde, ürünün yüzey sıcaklığı bir takım termik değerlere bağlı olarak hızlı bir şekilde artmaya başlar. Sözü geçen termik değerler şunlardır: erime ısısı, ısı iletkenliği, özgül ısı, buharlaşma ısısı.

Ürün parçalanma sıcaklığına kadar ısınınca piroliz başlar. Tekstil liflerinin ısıtılmasıyla önce lifleri oluşturan makromoleküller kopmaya başlar diğer bir deyişle polimerizasyon derecesi düşer. Fakat bu esnada ağırlık kaybı meydana gelmez. Belirli bir sıcaklıktan sonra piroliz yavaş bir seyir izlemektedir. Piroliz hızının düşük olmasından dolayı yanıcı gaz meydana gelmemektedir. Ancak belirli bir sıcaklıktan sonra piroliz hızının artması ile yanıcı gaz karışımı meydana gelmektedir. Piroliz sonucu meydana gelen parçalanma ürünleri şekilde gösterilmiştir.

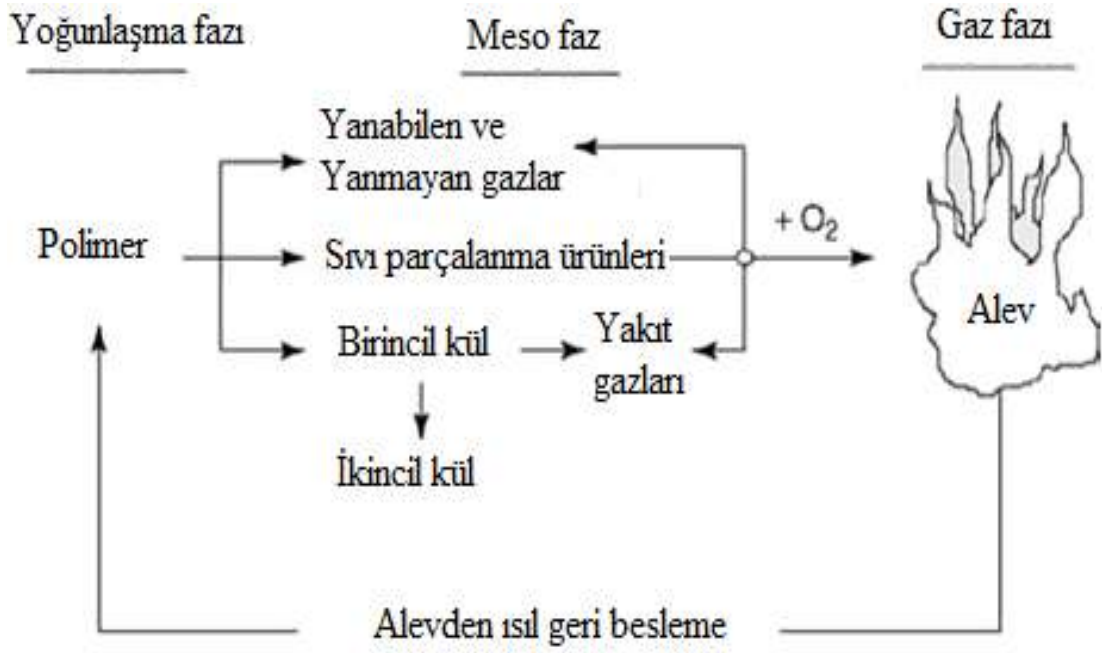
Pirolizik bozunma, lifin ve kumaşın özelliklerine; bilhassa oksijen içeriği olmak üzere liflerin ve kumaşın çevresel, kimyasal ve fiziksel modifikasyonlarına bağlıdır. Kimyasal bileşim ve polimerizasyon derecesi de pirolizik bozunmayı önemli derecede etkilemektedir. Kumaş özellikleri (örneğin gramaj, konstrüksiyon ve kumaş yüzeyinin yapısı) pirolizik bozunma üzerinde daha az etkiye sahiptir.

Lif ısıtıldığı zaman Tp sıcaklığında pirolize uğrar ve üretilen yanıcı katı, sıvı ve gaz atıklar yanma işleminin başlaması için gerekli olan yakıtı temin eder.

Kumaşların yanıcılığı ve pirolizi hem lif hem de kumaş özelliklerinden etkilenir. Lifin kimyasal yapısı yanıcılığı ve pirolizi etkileyen en önemli lif karakteristiğidir. Selüloz liflerinin piroliz mekanizması Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Kumaşın dokusu, gramajı, yüzey düzgünlüğü ve geçirdiği kimyasal terbiye işlemleri de pirolizi etkileyen faktörlerdir. Karışımlar için ise; karışımı oluşturan lif cinslerine ve oranlarına göre piroliz etkilenecektir. Özellikle pamuk sentetik lif karışımlarında, sentetik lifin eriyip damlama özelliği kumaşın pirolizi esnasında iskelet etkisi gösterecek ve pirolizin devamlılığını ve hızını arttıracaktır (Kutlu, 2002). Normal bir pamuğun pirolizi sonucu meydana gelen ürünlerin sadece %20'si yanıcı olmayan maddeler iken; tutuşmazlık bitim işlemi görmüş pamuk liflerinde bu oran % 60-75'e kadar çıkmaktadır. Piroliz sonucu açığa çıkan ürünler Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Selüloz liflerinin geri besleme ile piroliz ve yanma mekanizması (Bayramoğlu, 2003).



Şekil 4.2 Pamuk Liflerinde Piroлиз sonucu açığa çıkan ürünler (Lyon, 2005)

## 5. MATERYAL VE METOT

### 5.1 Kullanılan Numunenin Özellikleri ve Numunenin Hazırlanması

Tez çalışması için kullanılan hammadde çoğunluğu pamuklu kumaş, elyaf ve akrilik olmak üzere 5 kişinin çalıştığı bir konfeksiyon atölyesinden alınmıştır. Bu atölyede her gün 4,5 kg ve kumaş parçalarından oluşan atık çıkmakta ve bu atıklar çöpe atılmaktadır. Kısaca sadece bu iş yerinde yılda yaklaşık 1,3 ton kumaş atığı çıkmaktadır. Hammadde farklı renklerde ve büyüklükte, fakat genellikle yaklaşık 20 cm uzunluğunda ve 2 cm kalınlığında şerit halinde parçalardan oluşmaktadır. Atığın tamamen homojenize olabilmesi için eşit büyüklükte küçük parçalar halinde kesilmesi sağlanmıştır. Kuru numune kullanılmıştır.



Şekil 5.1 Çalışmada kullanılan tekstil atıklarının görünümü

### 5.1.1 Numunenin Kalorifik Değeri ve Numune Hazırlanması

Deneyler için kullanılan tekstil atıkları, deneylere başlamadan önce; daha önceden kalibrasyonu yapılmış İKA C 200 model kalorimetre cihazında ( Şekil 5.2) 0,302 gram ( Şekil 5.3) tartılarak cihaza yerleştirilmiş; yanmanın gerçekleştirilmesi için kapsüle oksijen basılmış ve numunenin ağırlığı girilerek işlem sonuçlandırılmıştır. 8 dakika sonra kalorimetre cihazından elde edilen sonuç 5778 cal/gr olarak belirlenmiştir. Diğer yakıtların kalorifik değerine bakıldığında ( Tablo 5.1) bu değer göstermektedir ki; tekstil atıkları enerji bakımından önemli bir potansiyele sahiptir.

Tablo 5.1 Çeşitli yakıtların ortalama kalorifik değerleri

Yakıt Tipi	Kalorifik Değer ( cal/gr)
LPG	11800
Benzin	11200
Fuel oil	11400
Taş kömürü	6400
Linyit	5330
Odun	3750
Gıda atığı	1450
Deri	4000
Polietilen ( PET)	11060



Şekil 5.2 IKA C 200 Kalorimetre Cihazı



Şekil 5.3 Kalorifik değer hesaplamada kullanılan 0,302 gram numune

## 5.2 Kullanılan Kimyasallar

Çalışmanın bazı aşamaları katalizör kullanılarak yapılmıştır. Bu katalizörler;  $\text{CaCO}_3$  ve  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ' tür.

## 5.3 Kullanılan Cihazlar ve Düzenekler

### 5.3.1 Piroliz Ünitesi

Çalışmada kullanılan piroliz ünitesi silindir şeklinde, paslanmaz çelikten yapılmış ve  $1000 \text{ m}^3$  hacindedir. Ayrıca üzerine sıcaklığı ölçebilmek için maksimum  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ ' yi gösteren bir termometre ve basıncı takip edebilmek için de 15 bara kadar çalışabilen bir barometre monte edilmiştir ( Şekil 5.4) Üniteye üç ayrı çıkış vanası mevcuttur. Sızdırmazlığı sağlayabilmek için ise ünitenin ağzı dairesel bir contayla sarılmıştır.



Şekil 5.4 Piroliz Ünitesi

Isıtma ilk başlarda piknik tüpüyle sağlanmış fakat gerekli olan yüksek sıcaklıklara ulaşılamadığından daha sonra deneyler ev tüpü ile yürütülmüştür. Ayrıca ısı kaybının önlenmesi için alevi ve ünitenin bir

kısmını içine alan iki tarafı açık, silindir metal bir levha eklenmiştir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 Ev tipi tüp ve silindirik levha

### 5.3.2 Soğutma Düzeneği

Deneylerde gazın yoğunlaştırılabilmesi için 360 mm boyunda 3 adet Soxhlet ekstraktörü birbirine geçirilip kullanılmıştır ( Şekil 5.6) Soxhlet ekstraktörlerinden geçirilen su yaklaşık 20 °C sıcaklığındaki musluk suyudur. En altta bulunan ekstraktöre bir erlen eklenmiş ve yoğunlaşan gazın burada toplanması sağlanmıştır.



Şekil 5.6 Soğutma Düzeneği ve Soxhlet Eksraktörleri

Şekil 5.6'da görüldüğü gibi ekstraktörlerin en altına bağlı bulunan erlen buz dolu bir leğende tutulmuştur. İlk çıkış borusuna da buz dolu poşetler konarak şok soğutma sağlanmış böylece gazın sıvılaşması kolaylaştırılmıştır. Erleniden kaçan yoğunlaşmamış gazlar ise gene bir boru ile içi saf su ile dolu bir bidona aktarılmıştır.

## 5.4 Deneysel Çalışmalar ve Numunenin Piroliz

Deneylere başlamadan önce hammadde olarak kullanılan elyaf, akrilik ve pamuklu kumaş parçaları küçük parçalar halinde kesilmiştir. Numunede herhangi bir nem oranı mevcut değildir. Daha sonra her denemede 100 gr. olarak tartılan numune piroliz ünitesinin içerisine yerleştirilmiştir. Kapak tamamen sızdırmaz olacak şekilde kapatıldıktan sonra; üniteden, piroliz için gerekli olan oksijensiz ortamı sağlamak üzere argon gazı geçirilmiştir. Daha sonra alttan ısıtma ev tipi tüp ile sağlanarak piroliz deneyleri başlatılmıştır. Yüksek ısıtma hızı, 10<sup>0</sup>C/dakika, ile yapılan ilk denemelerde basıncın aşırı yükseldiği ve bu yüzden fraksiyon işleminin verimli olmadığı görüldüğünden daha sonraki deneyler düşük ısıtma hızında, 5<sup>0</sup>C/dakika, gerçekleştirilmiştir. Ayrıca fraksiyon işlemi için gerekli su musluk suyundan sağlanmıştır.

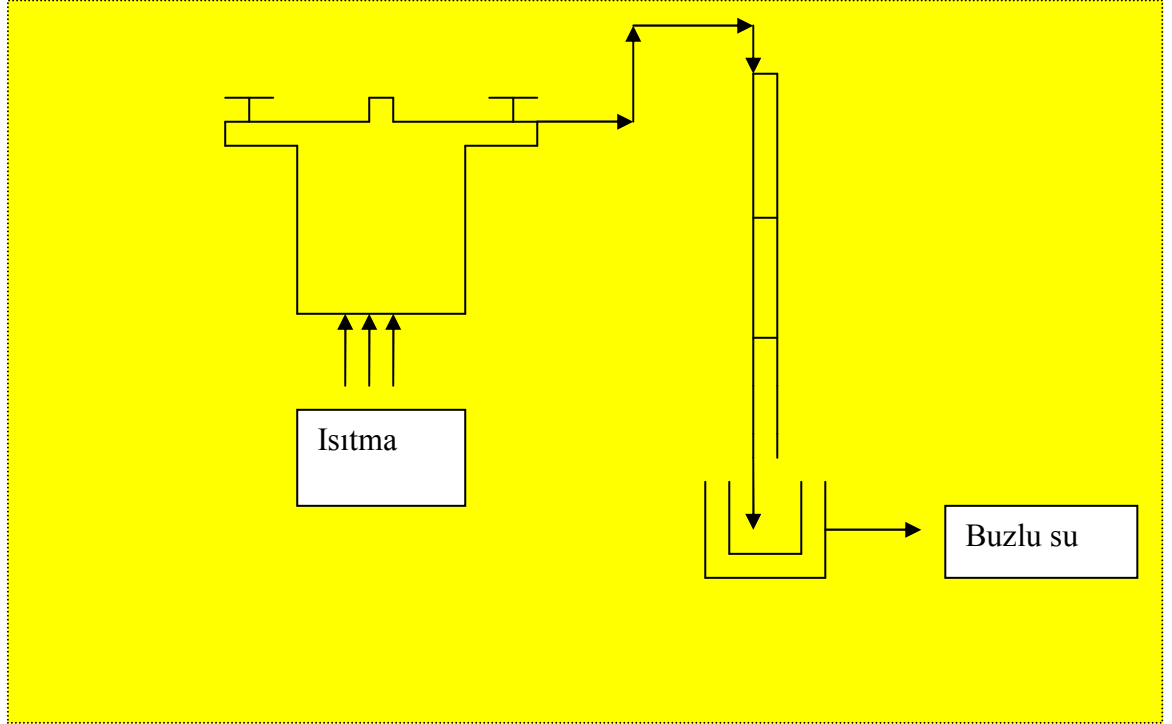
Literatürde yer alan bazı çalışmalar incelenmiş olup; bu çalışmalardan yola çıkılarak optimum sıcaklığın 500-600 <sup>0</sup>C arasında olması tahmin edilmiştir. Bu yüzden deneyler 450, 500, 550 ve 600 <sup>0</sup>C sıcaklıklar için gerçekleştirilmiştir. Katalizörün sıvı ürün verimine herhangi bir etkisinin bulunup bulunmadığını görebilmek için ise deneyler katalizörlü ve katalizörsüz olmak değişik ortamlarda gerçekleştirilmiştir. Katalizör olarak sodyum karbonat ve kalsiyum karbonat ile denemeler yapılmıştır. Deneylerde normal piroliz ortamı kullanılmıştır. Elde edilen sıvı ürün GC cihazında incelenmiştir.

Piroliz ünitesinin başlangıç sıcaklığı 30 <sup>0</sup>C'dir ve her bir denemede, bu sıcaklıktan son sıcaklığa kadar ısıtma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ünite son sıcaklıkta 1 saat kadar piroliz işleminin devam edebilmesi için bekletilmiştir. Sıvı ve katı ürünler reaktör soğuduktan sonra toplanmıştır.

Uygulanan piroliz yöntemi ve işlem parametrelerine bağlı olarak değişik özellikler gösteren sıvı fraksiyon su ve organik kimyasallardan oluşmakla birlikte genellikle sulu faz ve katran olmak üzere iki fazdan oluşur. Sulu faz oksijenli alifatik ve aromatik bileşiklerin kompleks karışımları şeklindedir. Katran fazı ise, orta boyutlu karbonhidratlar, fenoller, aromatikler, aldehitler ve bunların kondenzasyon ürünleri şeklindeki yüksek molekül ağırlıklı ürünleri içerirler.

Reaktör soğuduktan sonra toplanan katı ürün verimi, reaktörde kalan katı ürün tartılarak; sıvı ürün verimi, kondanse olabilen gazların soğutulması sonucu elde edilen sıvıdan katran süzülerek ayrıldıktan sonra tartım işlemi yapılarak; gaz ürün verimi ise toplam kütle denkliğinden hesaplanmıştır.

Piroliz akım şeması şekil 5.7’de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 Piroliz düzeneği akım şeması

## 6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

### 6.1 Sıcaklığın Piroliz Ürün Verimlerine Etkisi

Bu bölümde, deneyler normal piroliz ortamında, 5 °C/dakika yavaş ısıtma hızında ve sıcaklığın piroliz ürün verimlerine nasıl bir etkisinin bulunduğunu görmek için 450, 500, 550 ve 600 °C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Tablo 6.1, 6.2, 6.3 ve 6.4'te gösterilmiştir.

Tablo 6.1 450 °C sıcaklıkta piroliz ürün verimleri

Piroliz dönüşümü %	Sıvı ürün verimi %	Katı ürün verimi %	Gaz ürün verimi %
74,35	14,00	25,65	60,35

Isıtma hızı: 5 °C/dakika

Reaksiyon süresi: 1 saat 25 dakika

Katalizör: yok

Tablo 6.2 500 °C sıcaklıkta piroliz ürün verimleri

Piroliz dönüşümü %	Sıvı ürün verimi %	Katı ürün verimi %	Gaz ürün verimi %
77,73	10,41	22,27	67,32

Isıtma hızı: 5 °C/dakika

Reaksiyon süresi: 1 saat 30 dakika

Katalizör: yok

Tablo 6.3 550 °C sıcaklıkta piroliz ürün verimleri

Piroliz dönüşümü %	Sıvı ürün verimi %	Katı ürün verimi %	Gaz ürün verimi %
83,75	29,74	16,25	54,01

Isıtma hızı: 5°C/dakika

Reaksiyon süresi: 1 saat 40 dakika

Katalizör: yok

Tablo 6.4 600 °C sıcaklıkta piroliz ürün verimleri

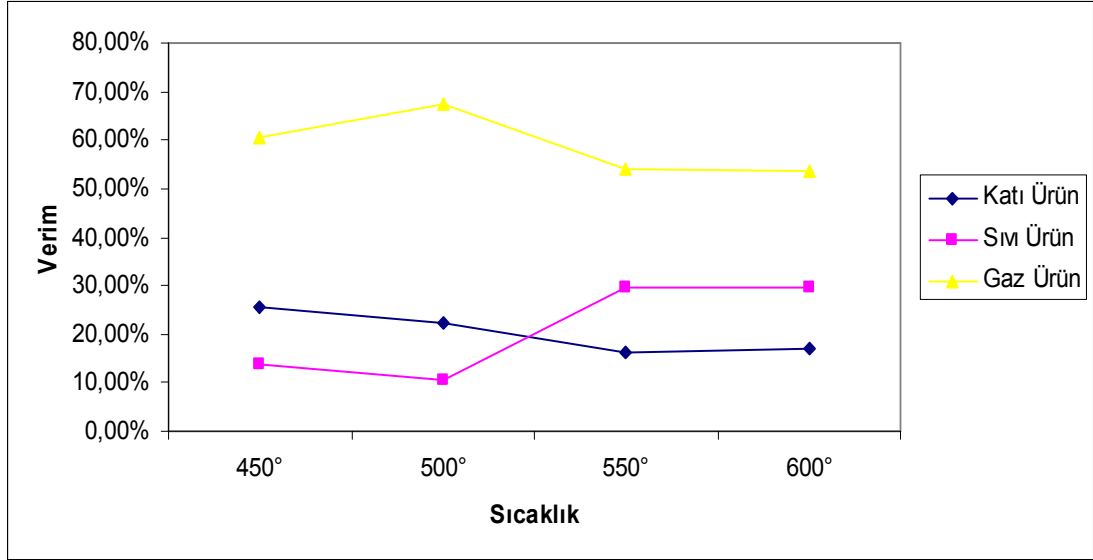
Piroliz dönüşümü %	Sıvı ürün verimi %	Katı ürün verimi %	Gaz ürün verimi %
83,09	29,49	16,91	53,60

Isıtma hızı: 5°C/dakika

Reaksiyon süresi: 1 saat 50 dakika

Katalizör: Yok

Şekil 6.1'de piroliz sıcaklığına bağlı olarak oluşan katı, sıvı ve gaz ürün verimleri grafik olarak gösterilmiştir. En yüksek piroliz dönüşümü % 83,75 ile 550 °C sıcaklıkta elde edilmiştir. Yine aynı sıcaklıkta en yüksek sıvı ürün verimi % 29,74 ile elde edilmiştir. Sıcaklığın artmasına bağlı olarak piroliz dönüşümünün arttığı ve daha az katı son ürünü kaldığı gözlemlenmiştir. Yine sıcaklığın artması ile sıvı ürün veriminin belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Buna bağlı olarak tekstil atıklarının pirolizinde optimum sıcaklık 550 °C olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.1 Piroliz sıcaklığının ürün verimlerine etkisi

## 6.2 Katalizörün Piroliz Ürün Verimlerine Etkisi

Bu bölümde, deneyler normal piroliz ortamında, 450, 500, 550 ve 600 °C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta,  $\text{CaCO}_3$  ve  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  katalizörleri kullanılarak yapılmıştır. Burada amaç katalizörün sıvı ürün verimine olan etkisinin saptanmasıdır. Sonuçlar Tablo 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11 ve 6.12'de verilmiştir.

Tablo 6.5 450 °C'de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  kullanılarak yapılan deney sonuçları

Piroliz dönüşümü %	Sıvı ürün verimi %	Katı ürün verimi %	Gaz ürün verimi %
71,48	18,00	28,52	53,48

Isıtma hızı: 5 °C/dakika

Reaksiyon süresi: 1 saat 25 dakika

Katalizör:  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ( 10 gram)

Tablo 6.6 450 °C'de CaCO<sub>3</sub> kullanılarak yapılan deney sonuçları

Piroliz dönüşümü	Sıvı ürün verimi	Katı ürün verimi	Gaz ürün verimi
%	%	%	%
71,53	18,38	28,47	53,15

Isıtma hızı: 5 °C/dakika

Reaksiyon süresi: 1 saat 25 dakika

Katalizör: CaCO<sub>3</sub> ( 10 gram)

Tablo 6.7 500 °C'de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> kullanılarak yapılan deney sonuçları

Piroliz dönüşümü	Sıvı ürün verimi	Katı ürün verimi	Gaz ürün verimi
%	%	%	%
73,60	28,40	26,40	45,20

Isıtma hızı: 5 °C/dakika

Reaksiyon süresi: 1 saat 30 dakika

Katalizör: Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ( 10 gram)

Tablo 6.8 500 °C'de CaCO<sub>3</sub> kullanılarak yapılan deney sonuçları

Piroliz dönüşümü	Sıvı ürün verimi	Katı ürün verimi	Gaz ürün verimi
%	%	%	%
69,47	26,20	30,53	41,28

Isıtma hızı: 5 °C/dakika

Reaksiyon süresi: 1 saat 30 dakika

Katalizör: CaCO<sub>3</sub> (10 gram)

Tablo 6.9 550 °C'de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> kullanılarak yapılan deney sonuçları

Piroliz dönüşümü %	Sıvı ürün verimi %	Katı ürün verimi %	Gaz ürün verimi %
79,60	33,40	20,40	46,20

Isıtma hızı: 5<sup>0</sup>C/dakika

Reaksiyon süresi: 1 saat 40 dakika

Katalizör: Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ( 10 gram)

Tablo 6.10 550 °C'de CaCO<sub>3</sub> kullanılarak yapılan deney sonuçları

Piroliz dönüşümü %	Sıvı ürün verimi %	Katı ürün verimi %	Gaz ürün verimi %
67,48	31,20	32,52	36,28

Isıtma hızı: 5<sup>0</sup>C/dakika

Reaksiyon süresi: 1 saat 40 dakika

Katalizör: CaCO<sub>3</sub> ( 10 gram)

Tablo 6.11 600 °C'de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> kullanılarak yapılan deney sonuçları

Piroliz dönüşümü %	Sıvı ürün verimi %	Katı ürün verimi %	Gaz ürün verimi %
77,66	25,85	22,34	51,81

Isıtma hızı: 5<sup>0</sup>C/dakika

Reaksiyon süresi: 1 saat 50 dakika

Katalizör: Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ( 10 gram)

Tablo 6.12 600 °C'de CaCO<sub>3</sub> kullanılarak yapılan deney sonuçları

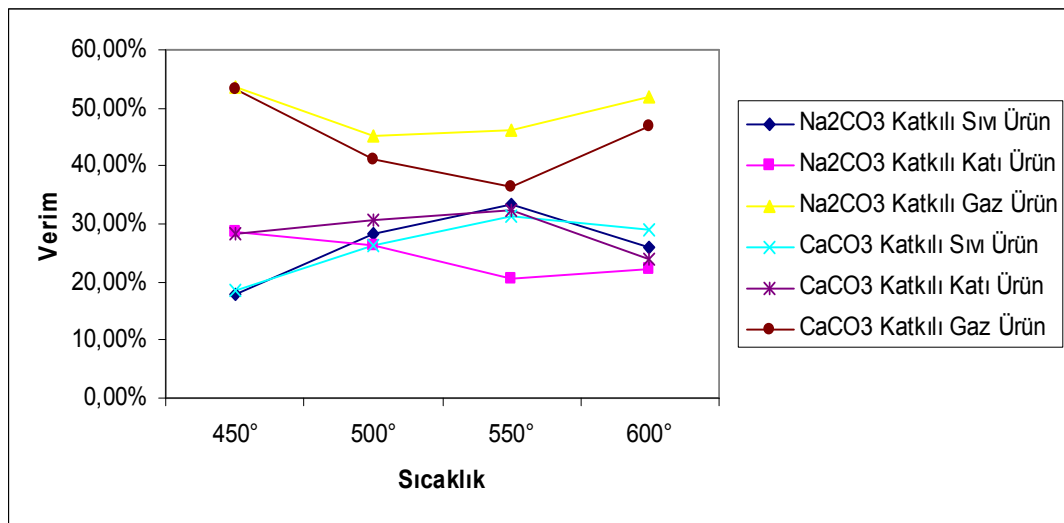
Piroliz dönüşümü	Sıvı ürün verimi	Katı ürün verimi	Gaz ürün verimi
%	%	%	%
75,91	28,92	24,09	46,99

Isıtma hızı: 5°C/dakika

Reaksiyon süresi: 1 saat 50 dakika

Katalizör: CaCO<sub>3</sub> ( 10 gram)

Sonuçlar incelendiğinde katalizör kullanımının sıvı ürün verimini arttırdığı görülmüştür. 450 °C'de katalizör kullanılmadan yapılan deneyde sıvı ürün verimi %14 olarak elde edilmişken Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> kullanıldığında bu oran % 18'e, CaCO<sub>3</sub> kullanıldığında ise % 18,38'e yükselmiştir. Yine optimum sıcaklık olarak tespit edilen 550 °C'de; katalizör kullanılmadan yapılan deneyde sıvı ürün verimi % 29.74 iken; katalizör olarak CaCO<sub>3</sub> eklendiğinde sıvı ürün verimi % 31,20'ye, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> eklendiğinde ise % 33,40'a kadar çıktığı tespit edilmiştir. Katı ürün veriminde ise katalizör kullanımına bağlı olarak bir azalma söz konusudur. Katalizör kullanımının ürün verimlerine etkisi Şekil 6.2'de grafik olarak gösterilmiştir.

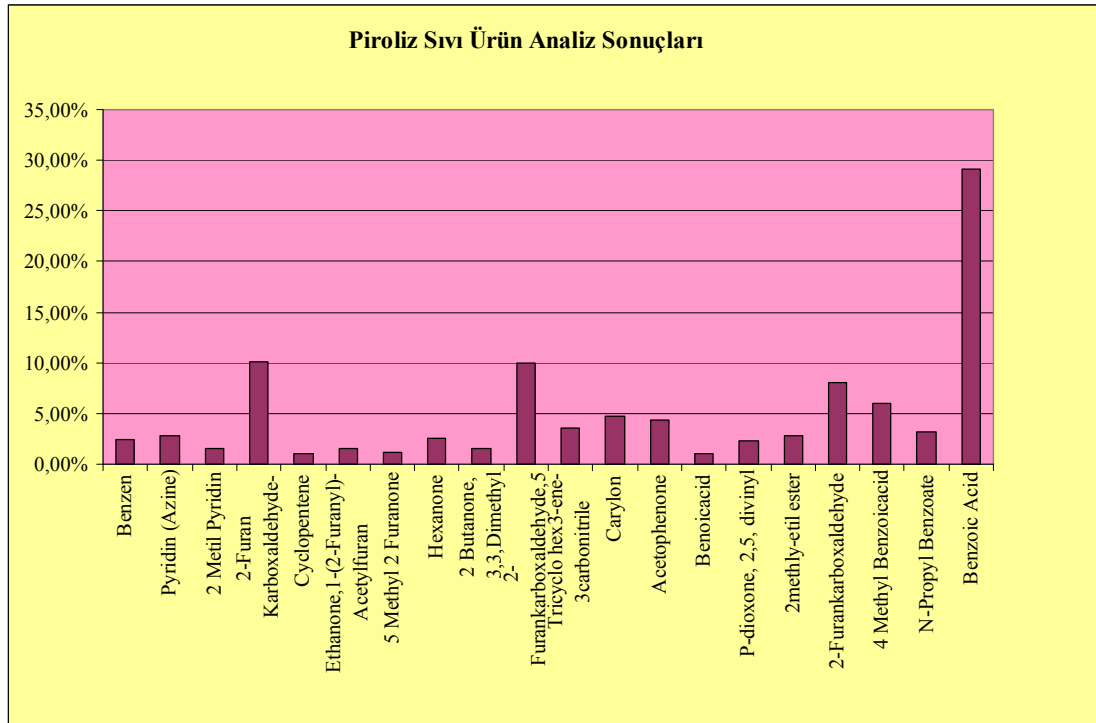


Şekil 6.2 Katalizör kullanımının ürün verimlerine etkisi

Katalizör kullanımı genel olarak sıvı ürün verimini arttırmaktadır. Deneysel çalışmalarda kullanılan alkali katalizörler C-C bağlarını zayıflatarak kararlı kimyasal yapıların oluşumunu önlemektedirler. Alkali katalizörler polimerik zincirlerin moleküller arası etkileşimlerinin zayıflamasına neden olmaktadır ( Rustamov, et.al, 1998).

### 6.3 Piroliz Sıvısının Kimyasal Bileşimi

Gaz kromatografi cihazında yapılan incelemeye göre; deneyler sonucu elde edilen sıvı ürünün ham petrol ve şist petrolüne büyük yakınlık gösterdiği görülmüştür. Şekil 6.3'de analiz sonuçları belirtilmiştir.



Şekil 6.3 Piroliz sıvı ürününün analiz sonuçları ve konsantrasyonları

Piroliz sonucu elde edilen sıvı üründe Şekil 6.3'de görüldüğü üzere yüksek oranda ( % 29,07) Benzoik asit tespit edilmiştir. Ayrıca Benzen ( % 2,48), Piridin ( % 2,86), Furan ya da Furfural ve bileşikleri ( % 30,86), Hekzanon ( % 2,59), Siklo pentan ( % 1), Propil bezoat ( 3,17) gibi maddeler de tespit edilmiştir. Bu bölümde tespit edilen maddeler incelenecektir. Deney sırasında sıvılaştıran gazın ilk sıcaklığı 52 °C olarak tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu sıcaklıktan yüksek olan gazlar sistemden

uzaklaşmışlardır. 52 °C ve daha düşük sıcaklıktaki gazlar sıvılaştırılabilmektedir.

### 6.3.1 Benzoik Asit

Aromatik organik asitler sınıfının ilk üyesidir. Kimyasal formülü  $C_6H_5COOH$  şeklinde olup, beyaz ve katıdır. Erime noktası 122 °C, kaynama noktası 249 °C'dir. Soğuk suda az, sıcak suda rahat çözünür. Asetik asitten daha iyi iyonlaşır. Ticari olarak benzotriklorürün su ile reaksiyonundan ve toluenin oksitlenmesinden elde edilir. Benzoik asit en çok sodyum benzoat ve sentetik plastiklerin elde edilmesinde, pamuklu boyamada ve tütünleri ilaçlamada kullanılır. Asidik yiyeceklerde gelişen bakterileri öldürdüğü için konservecilikte geniş çapta kullanılır.

### 6.3.2 Furan ( Furfural)

Furan ya da furfuran, bir heterosiklik aromatik organik bileşiktir. Renksiz, uçucu ve yanıcı bir sıvıdır. Zehirli ve kanserojendir. Moleküler formülü  $C_4H_4O$  şeklindedir. Kaynama noktası 31,4 °C'dir. Molekül ağırlığı 68,07 gr/mol'dür. Genellikle selülozik katıların termal olarak dekompozisyonundan elde edilir. Piroliz hammaddesi olarak tekstil kumaşları kullanıldığından, elde edilen sıvıda bulunması beklenmektedir.

### 6.3.3 Benzen

Benzen aromatik hidrokarbonlar olarak adlandırılan organik bileşikler sınıfının en basit üyesidir. Renksiz, alevlenebilen, kaynama noktası 80,1 °C, erime noktası 5,5 °C olan bir sıvıdır. Moleküler formülü  $C_6H_6$ 'dır. Benzen endüstriyel bakımdan önemli olduğu gibi yapısı bakımından da kimya çalışmalarında önemlidir. Benzen sanayide, plastik imalinde kullanılan stiren ve fenolün sentezinde başlangıç maddesi olarak, naylon bileşenlerinde, sentetik deterjan imalinde kullanılır. Uçak benzinlerinde, boya yapmaya yarayan anilin başlangıç maddesi ve böcek öldürücü olarak da benzen kullanılır. Benzen aynı zamanda iyi bir çözücüdür.

### 6.3.4 Piridin

Bir azot ve beş karbondan meydana gelmiş bir heterosiklik bileşiktir. Kaynama noktası 115,2 °C'dir. Taşkömürü katranında bulunan piridin, günümüzde amonyak ve asetilenden elde edilmektedir. Endüstride ve kimyada kullanışlı bir çözücüdür. Piridin bir çok maddenin başlangıç maddesi olması bakımından önemlidir. Piridin türevlerinin bir çoğu ilaç sanayinde kullanılan alkoaoittir. Piridin çok kötü bir kokusu vardır. Deneyler sırasında oluşan kötü kokunun kaynağı olduğu düşünülmektedir.

### 6.3.5 Hekzan

Hekzan düz zincirli bir alkandır. Laboratuarda yağ çözücü olarak, sanayide organik çözücü olarak kullanılmaktadır. Formülü C<sub>6</sub>H<sub>14</sub> şeklindedir. Heptan ve oktanın yağı daha iyi çözmesine rağmen hekzan bulmak daha kolaydır. Reaktivitesi düşük olduğundan iyi bir çözücü olarak yapıştırıcıların içinde kullanılır. Kuvvetli oksidanlar ile şiddetli tepkimeye girerek yangına ve patlamaya neden olabilir. Hekzan buharı havadan ağır olduğu için zeminde yayılarak uzak mesafelerde tutuşmalara neden olabilmektedir.

### 6.3.6 Siklo Pentan

Siklo pentan bir çeşit alkandır. Fakat düz bir zincir oluşturmadığından, halkalı yapısından dolayı siklo ön ekini alarak kullanılmaktadır. Parafinler serisinden beş karbonlu bir hidrokarbondur. Doğal benzinde bol miktarda bulunmaktadır. Kaynama noktası 36 °C'dir.

### 6.3.7 Propil Benzoat

Propil benzoat gıda katkı maddesi olarak da kullanılan organik bir bileşiktir. Kötü bir kokuya sahiptir. Piridinden sonra propil benzoatın da piroliz sıvısında bulunmasından dolayı kötü kokunun nedeni anlaşılmaktadır. Kaynama noktası 230 °C'dir. Propil benzoat, metil benzoatın propanol ile esterifikasyonundan sentezlenmektedir.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dünya nüfusunun ve gelişen endüstrinin gün geçtikçe artan enerji ihtiyacı, enerji sorununu sürekli olarak insanlık gündeminde tutmaktadır. Bu nedenle yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının araştırılması konusundaki çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır.

Ülkemiz birincil enerji kaynakları olan petrol, doğal gaz ve taşkömürü açısından önemli bir rezerve sahip değildir. Ayrıca önemli bir rezerv kabul edilebilecek linyitlerin kullanılması da sera etkisi ve asit yağmurları gibi çevre sorunlarına neden olmaktadır. Bu nedenle, özellikle enerji yönünden dışa bağımlı ülkeler arasında yer alan ülkemizde, enerji elde edilebilecek her türlü seçenek dikkatle araştırılmalı ve tartışmaya açılmalıdır.

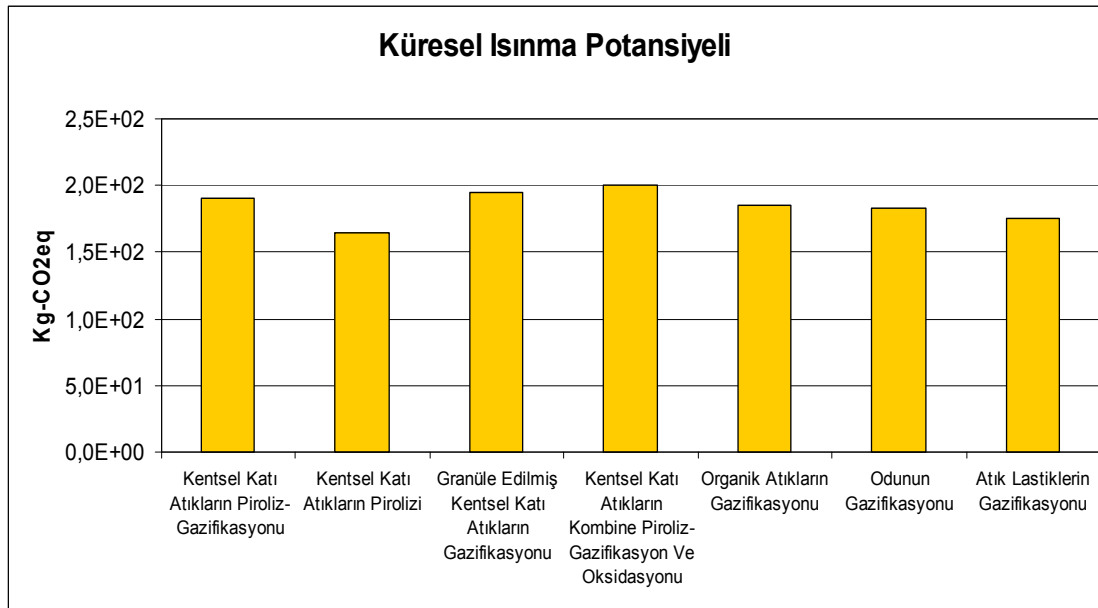
Bu anlayışla; ülkemizin tekstil sanayi bakımından gelişmiş olduğu düşünülürse, tekstil fabrikalarından veya atölyelerinden arta kalan kumaş parçalarının değerlendirilmesi önemlidir. Çünkü bu çalışmada incelenen kumaş parçalarının azımsanmayacak derecede bir enerji potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca bu parçalar tekrar kullanım için uygun olmadığından, değerlendirilmediği takdirde düzenli depolamaya gönderilmekten başka çare olmadığı görülmektedir. Böyle bir potansiyelin boşa gitmemesi adına bu çalışmada tekstil atıklarının pirolizi ve bu yöntemle enerji elde edilmesi incelenmiştir.

Piroliz hava yokluğunda gerçekleştiğinden  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  ve diğer yakıt gazları dışında bir emisyon üretmez. Yapılan AR-GE çalışmaları bu teknoloji ile atığın %60-75'inin 20-24 Mj/kg kalorifik değere sahip gaza dönüştürme kapasitesine sahip olduğu ve oluşan gazın şartlandırılması ile gaz motorları, türbinleri ve yakıt pilleri için uygun olacağı ortaya çıkmıştır. Diğer ürünler 15-18 Mj/kg kalorifik değere sahip alternatif yakıt, aktif karbon veya gübre olmaya uygun karbon granülüdür. Bu sebeple proses atığının %90-97'sini pazarlanabilir ürünlere dönüştürebilir ve % 30-45 toplam verim ile elektrik üretimi ve %15 karbon granülünden enerji geri kazanımı ile çalışlabilmektedir.

Piroliz sıvısı ham petrolün yaklaşık yarısına eş enerji miktarına sahiptir. Çalışmadan elde edilen piroliz sıvısı gaz kromatografi cihazında incelenmiş olup, sıvının ham petrole büyük yakınlık gösterdiği görülmüştür.

Piroliz gazı da jeneratörlere bağlı olan gaz türbinlerinde veya gaz motorlarında yakılarak elektrik üretimi için kullanılır.

Çevresel performans açısından bakıldığında; Khoo tarafından yapılan ve alternatif atık dönüşüm metotlarını karşılaştıran çalışmada (şekil 7.1) piroliz, gazlaştırma ve oksidasyon proseslerinin değişik kombinasyonlarını içeren yedi farklı entegre dönüşüm teknolojisi ve bunların küresel ısınma potansiyelleri incelenmiştir. Bu hayat döngüsü değerlendirmesinin sonuçlarına göre katı atıkların pirolizi en düşük küresel ısınma potansiyeline sahiptir. Bunu takiben organik atıkların gazlaştırılması ve katı atıkların kombine piroliz ve gazlaştırılması teknolojileri gelmektedir. Bu durum piroliz ve gazlaştırmaya yakma metoduna kıyasla bir avantaj kazandırmaktadır.



Şekil 7.1 Piroliz, Gazifikasyon ve Yakma Proseslerinin Değişik Kombinasyonlarının Çevresel Performansı

DeneySEL çalışmalar göstermiştir ki; optimum sıcaklık 550 °C sıcaklık değeridir ve bu sıcaklıkta en fazla sıvı ürün verimi elde edilmiştir. Bu sıcaklıkta yapılan üç deneye bakıldığında ise, katalizör olarak Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> kullanıldığında daha yüksek sıvı ürün veriminin elde edildiği görülmüştür.

Sonuç olarak yapılan çalışmada tekstil atıklarının pirolizi ile elde edilen sıvı ürün incelenip, umut verici sonuçlar bulunmuştur. Bu bulgulardan hareketle ülkenin enerji sorunu karşısında yeni ve yenilenebilir enerji kaynağı olarak tekstil atıklarının potansiyelinin değerlendirilmesi ve bu konudaki çalışmaların ve araştırmaların genişletilerek sürdürülmesi gerektiği düşünülmektedir. Ayrıca piroliz ünitesi modifiye edilerek çok daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Örneğin, piroliz ünitesine bağlı borular daha geniş tutularak, biriken katranın daha rahat temizlenmesi sağlanabilir. Üniteye bağlı vanadan çıkan piroliz gazları hortumla soklet borulara aktarılırken daha kısa hortumlar kullanılabilir. Böylece çıkan gazın soğutma sistemine daha çabuk ulaşması sağlanabilir ve hortum içinde sıvının birikmesi önlenmiş olmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Aybar, E.N., 1990, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı “Genel Enerji Planlaması” Çalışmalarının İlk Sonuçları, Türkiye 5. Enerji Kongresi, Ankara, 76-220.
- Bayramoğlu, E.Ç., 2003, Lyocell ve Lyocell/Pamuk Karışımlarının Alev Etkeni Karşısındaki Davranışları, Marmara Üniversitesi Doktora Tezi, İstanbul.
- Borat, M., 1999, Katı Atıkların Yönetimi, İstanbul Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü Ders Notları, 61-62, 106-108.
- Bridgwater, A.V., Fast Pyrolysis of Biomass, 1-5.
- Brown, T.R., Wright, M.M., Brown, R.C, 2010, Estimating Profitably of Two Biochar Production Scenarios: Slow Pyrolysis vs Fast Pyrolysis, 1-2.
- Çağlar, A., 2004, Çay Atığının Katalitik Pirolyzi: Sıvı Ürün Verimi Üzerine Katalizörlerin Etkisi, Kastamonu Eğitim Dergisi, 385-392.
- Defra, 2007, Incineration of Municipal Solid Waste, 6-8.
- Encinar, J.M., Gonzalez, J.F., Gonzalez, J., Fuel Process Technologies, 2-3.
- Ertaş, M., Alma, M.H., 2008, Defne Atıklarından Pirolyz Metodu ile Sentetik Sıvı Yakıt Üretimi, 7. Ulusal Enerji Sempozyumu, İstanbul, 1-10.
- Fichtner, C., 2004, The viability of Advanced Thermal Treatment of MSW in the UK, 4-5.
- Greenhouse, 2008, Gas Balances of Waste Management Scenarios Report for the Greater London Authority.
- Grohmann, K., C.E and Himmel, M.E., 1990, Potential for Fuels from Biomass and Wastes, Emerging Technologies for Materials and Chemicals from Biomass, 354-392.
- Hajaligol, M.R., Howard, J.B., Longwell, J.P. and Peters, W.A., 1982, Product Compositions and Kinetics for Rapid Pyrolysis of Cellulose, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., Vol. 21, 457-465.
- Hallenbeck, P.C., Fermentative Hydrogen Production: Principles, Progress and Prognosis, 3-4.
- Islam, M.R., Fardoushi, J., Pyrolysis Kinetics Behavior of Solid Tire Wastes Available in Bangladesh, 2-4.

- Kalın, M.B., 2008, Tekstil Yüzeylerinin Yanmaya Karşı Dirençlerinin Arttırılması.
- Kutlu, B., 2002, Isıya Dayanıklı ve Isıdan Koruyucu Giysilerin Termal Analizi ve Performans Özellikleri, Dokuz Eylül Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Lucchesi, A., Guisepe, M., Casimo, R., 1988, A Pilot Plant for the Study of the Production of Hydrogenrich Syngas by Gasification of Biomass, The International Conference on Research in Thermochemical Biomass Conversion, Phoenix, Arizona, USA, 179-191.
- Lyon, R.E., 2005, Encyclopedia of Polymer Science and Technology, John Wiley and Sons. Inc.
- Miranda, R., Sosa, C.B., Bustos-Martinez, D., Vasile, C., Pyrolysis of Textile Wastes: Kinetics and Yields, 1-4.
- Özcan, G., 2002, Örme Kumaş Yapısının Güç Tutuşma Özelliklerine Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Doktora Tezi, İstanbul.
- Pahn, A.N., Changkook, R., Vida, N.S., Characterisation of Slow Pyrolysis from Segregated Wastes for Energy Production, 1-3.
- Piskorz, J., Scott, D.R., Radlein, D., Symposium Series Composition of Oils Obtained from Fast Pyrolysis of Different Woods.
- Slater, B., 2008, Pyrolysis, Gasification and Plasma Technologies Briefing.
- Taner, F., 1990, Katı Atıkların Sıvılaştırılarak Akaryakıtı Dönüştürülmesi, Türkiye 5. Enerji Kongresi, Ankara.
- Tezçakar, M., 2008, Atıktan Enerji Elde Edilmesinde Termal Bertaraf Teknolojileri, 1-6.
- Üçgöl, İ., Akgöl, G., 2010, Biomass Technology, Yekarum Dergisi, 5-7.
- Wampler, T.P., 2007, Applied Pyrolysis Handbook, 1-8, 18-19.
- Velerius, H., 2006, Municipal Waste Collection Treatment System for Developing Countries, 2-3.
- Yaldız, O., 2004, Biyogaz Teknolojisi, Akdeniz Üniversitesi Yayınları, 30-46.

## **ÖZGEÇMİŞ**

1980 yılında İzmit'te doğan Sibel Barışçı, ilkokulu İzmit Ulugazi ilkokulunda, ortaokulu İzmit Merkez ortaokulunda ve liseyi de İzmit Gazi lisesinde tamamlamıştır. 2001 yılında İstanbul Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğrenimini bitirdikten sonra 2008 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Çevre Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans öğrenimine başlamıştır.