

Geri Kazanılmış Pet'in Kullanımı

Usage of Recycled Pet

A. Ebru TAYYAR* ve Sevcan ÜSTÜN

Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, 64200, Uşak

Geliş Tarihi/Received : 28.07.2009, Kabul Tarihi/Accepted : 10.10.2009

ÖZET

Gün geçtikçe artan sanayileşme, kentleşme ve teknolojik gelişmeler doğal kaynakların tükenmesi ve çevre kirliliği problemlerinin artmasına neden olmuştur. Özellikle atıkları düzenli bir şekilde bertaraf edebilmek için yeterli alanı bulunmayan ülkeler için atıkların değerlendirilmesi veya bertaraf atık miktarının ve hacminin azalması yönünde büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bu amaçlar doğrultusunda, hem kaynakları koruma hem de çevre kirliliğini önleme amacıyla birçok çalışma yapılmakta ve projeler geliştirilmektedir. PET şişeler özellikle alkolsüz içecekler sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır ve fiziksel veya kimyasal geri kazanım işleminden geçirilerek yeniden kullanılabilir. Geri kazanılmış PET şişelerin kullanım alanları hızla gelişmektedir. Geri kazanılmış PET plastik endüstrisinde kullanıldığı gibi kompozit sektörü de bu malzemenin kullanımında alternatifler sunmaktadır. Tekstil sektörü de ham maddesi polimer olan bazı plastiklerin geri dönüşümü için uygun bir sektördür. Bu çalışmada atık PET şişelerin geri dönüşümü teknolojisi ve uygulamaları incelenmiş ve bu konuda yapılmış bilimsel çalışmalar özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : PET şişe, Geri dönüşüm, Atık, Tekstil, Polietilen tereftalat (PET).

ABSTRACT

The increasing industrialization, urbanization and the technological development have caused to increase depletion of the natural resources and environmental pollution's problem. Especially, for the countries which have not enough space recycling of the waste eliminating waste on regular basis or decreasing the amount and volume of waste have provided the important advantages. There are lots of studies and projects to develop both protect resources and prevent environmental pollution. PET bottles are commonly used in beverage industry and can be reused after physical and chemical recycling processes. Usage areas of recycled PET have been developed rapidly. Although recycled PET is used in plastic industry, composite industry also provides usage alternatives of recycled PET. Textile is a suitable sector for recycling of some plastics made of polymers too. In this study, the recycling technologies and applications of waste PET bottles have been investigated and scientific works in this area have been summarized.

Keywords : PET bottles, Recycling, Waste, Textile, Polyethylene terephthalate (PET).

1. GİRİŞ

Plansız endüstrileşme ve sağlıksız kentleşme, nükleer denemeler, bölgesel savaşlar, verimi artırmak amacıyla tarımda kimyasal maddelerin bilinçsizce kullanılmasıyla birlikte, gerekli çevresel önlemler alınmadan ve arıtma tesisleri kurulmadan yoğun üretime geçen sanayi tesisleri, çevre kirliliğini tehlikeli boyutlara çıkarmıştır. Yapılan araştırmalar dünyadaki mevcut çevre kirliliğinin % 50'sinin, son 35 yılda meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Diğer bir açıdan, hızlı nüfus artışı çevre sorunlarına önemli

bir kaynak teşkil etmektedir. Türkiye, OECD ülkeleri arasında en yüksek nüfus artış oranına sahiptir. Birleşmiş milletlerin yaptığı nüfus tahminlerine göre, Türkiye nüfusunun 2025 yılında 92 milyona yükselmesi beklenmektedir. Bu durum ülkemizin bugün olduğu kadar, gelecekte de çevre sorunları ile karşılaşacağına bir göstergesidir (Anon., 2009a). Bu amaçla atık politikaları geliştirilmiş ve özellikle plastik endüstrisinde kullanılan malzemelerin yıllar boyu çevrede yok olmaması ve gün geçtikçe bu atıkların birikmesiyle oluşan atık sahaları nedeniyle

* Yazışılan yazar/Corresponding author. E-posta adresi/E-mail address : ayseebru.tayyar@usak.edu.tr (A. E. Tayyar)

bu atıkların geri dönüşümüyle tekrar uygulamaya kazandırılması şeklinde atık yönetimi çalışmaları yapılmaktadır. Ülkemizde ve dünyadaki katı atıkların yönetiminin üç temel prensibi vardır:

- Daha Az atık üretilmesi (less waste production),
- Atıkların geri kazanılması (recycle wastes),
- Atıkların çevreye zarar vermeden bertaraf edilmesi (disposal wastes without hazardous).

Türkiye’de gelişmiş ülkelere göre daha az yüzdelerde de olsa plastik kullanımında artış vardır. Örneğin; 1960 yılında kullanılan plastik kişi başına 0,6 kg iken 1977 yılında 5,25 kg, 1987 yılında 9,05 kg, 1989 yılında 9,65 kg, 1992 yılında 13,54 kg’dır (Sevencan, 2007). Geleceği bugünden korumak düşüncesiyle yapılan çalışmalarda esas, geri dönüşümü sağlayarak ham madde kaynaklarını korumak ve atık miktarını azaltmak böylece çevreye uygulanan yükü hafifletmektir. Örneğin; kullanılmış kâğıdın tekrar kâğıt imalatında kullanılması hava kirliliğini % 74-94, su kirliliğini % 35, su kullanımını % 45 azalttığı ve bir ton atık kâğıdın kâğıt hamuruna katılmasıyla 8 ağacın kesilmesi önlenebildiği bilinmektedir (Anon., 2009a). Bir adet PET şişe üretimi için yaklaşık olarak 1,2 kg ham petrol kullanıldığı ve ham petrolün çıkarılması için gerekli su tüketiminin kuyuya bağlı olduğu ve tam olarak bilinmediği için en az 65 lt su tüketildiği bilinmektedir. Ayrıca ham petrol arama ve çıkartma işlemlerinde tüketilen elektrik miktarının bilinmemesine rağmen en az 200W/sa’lik elektrik tüketildiği görülmektedir. Bir plastik şişe ise doğada 3 bin yıl süreyle yok olmamaktadır ve bir ton plastik geri kazanıldığında 14 bin kW/sa enerji tasarrufu sağlanmaktadır (Anon., 2009c).

2. PET ATIKLARI

Türkiye Çevre Sorunları Vakfı’nın bir yayınında katı atık “İnsanların sosyal ve ekonomik etkinlikleri esnasında veya sonucunda işe yaramaz hale gelen ve akıcı olabilecek kadar sıvı içermeyen her tür madde ve malzemeler” şeklinde tanımlanmaktadır. Geri dönüşüm ve tekrar kullanımın ötesinde, atıkların özelliklerinden yararlanılarak içindeki bileşenlerin fiziksel, kimyasal veya biyokimyasal yöntemlerle başka ürünlere veya enerjiye çevrilmesine ise “Geri kazanım” denilmektedir (Anon., 2009b). Bu kavramların doğrultusunda daha az atık ve atığın geri kazanımı çevre problemlerinin giderilmesinde en kolay ve en güvenilir yolu oluşturmaktadır. Amerikan Plastik Konseyi’nin 2002 yılındaki toplantısında PET geri dönüşümünün tekrar hızlandırılması başlığı tartışılmıştır. 2002 yılı Ulusal Tüketici Plastik Geri Dönüşüm Raporu’na göre 1994’te PET geri dönüşüm hızı % 38 iken, 2002 yılında % 20’ye kadar düşmüştür. HDPE geri dönüşüm hızı 1994 yılında % 12’den 2002’de % 24’e yükselmiştir. Avustralya’da her yıl 80 bin ton PET ürününün 25 bin tonu (% 31) geri dönüştürülerek tekrar kullanılmaktadır (Sevencan, 2007). PET esaslı katı

atıklar, dünyadaki katı atık miktarının ağırlıkça % 8 ve hacimce % 12’sini oluşturmaktadır.

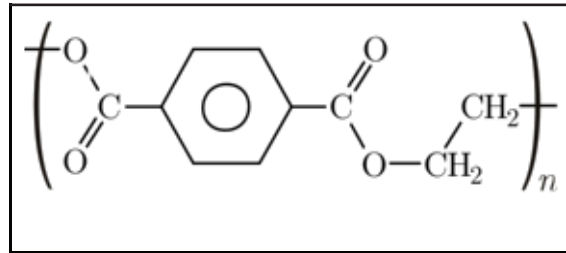
PET geri kazanım oranının ülkelere göre dağılımı şöyledir (Sevencan, 2007):

- Çin %70 – 85
- AB %35
- ABD %23
- Japonya % 64
- Diğer ülkeler %20-40.

Türkiye’de yıllık 165 bin ton pet şişe üretilmektedir. Fakat bunun sadece 40 bin tonu geri dönüştürülebilmektedir. Her yıl doğaya karışan 125 bin ton pet şişenin maddi değeri 70 milyon dolardır ve Türkiye sentetik elyafa yılda 1,7 milyar dolar ödemektedir. Bunun 1 milyar doları geri dönüşümden kazanılan polyester elyafın ithaline gittiğine göre geri dönüşüm konusuna yeterince önem verilirse 1 milyar dolar Türkiye’de kalabilecektir (Anon., 2007).

3. PET’İN KİMYASAL YAPISI

Şekil 1’de molekül yapısı gösterilen polietilen tereftalat termoplastik bir eriyektir. Düşük vizkoziteli veya yüksek vizkoziteli olarak sınıflandırılmaktadır. “Staple PET” de denilen düşük vizkoziteli reçine iplik, şişe, fotoğraf filmi üretimi gibi birçok uygulamalarda kullanılmaktadır. “Endüstriyel” veya “Heavy Denier” PET denilen yüksek vizkoziteli reçineler ise lastik kablo, emniyet kemeri v.b. ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır. PET reçineler ticari olarak etilen glikol ve dimetiltereftalat (DMT) veya tereftalik asitten (TPA) üretilmektedir. Dimetiltereftalat ve tereftalik asit katıdır. Tereftalik asit süblimleşirken dimetil tereftalat 140 °C’de erimektedir. Üretim iki adımda yapılmakta, birinci adımda bis-(2-hidroksietil)-tereftalat (BHET) monomeri ve metanol veya su oluşmaktadır. Sonrasında ise bis-(2-hidroksietil)-tereftalat monomeri basınç, sıcaklık ve katalist etkisiyle polimerleşmekte ve PET eriyik üretilmektedir. Dimetiltereftalat kullanılan proseste metanol üretildiği ve metanol geri dönüşüm sistemi, safsızlaştırma operasyonları gerektirdiği için tereftalik asit ile üretimi yaygınlaşmaya başlamıştır (Küçükgül ve Kırşen, 2007). Tablo1’de PET’in fiziksel ve kimyasal özellikleri belirtilmiştir.



Şekil 1. PET’in molekül yapısı (Anabal, 2007).

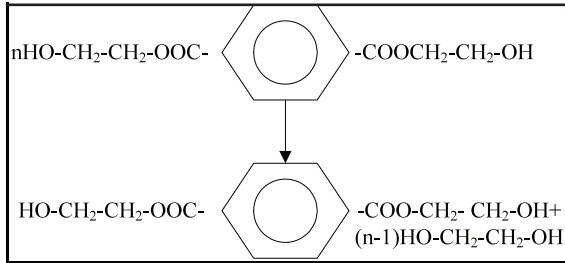
Tablo 1. PET'in fiziksel ve kimyasal özellikleri (Anabal, 2007).

Özellik	Test Metodu	Değer
Moleküler Ağırlık	-	192 (g mol ⁻¹)
Mark-Houwink Parametreleri	-	k=3.72×10 ⁻² (ml g ⁻¹)=0.73
Ortalama Mol. Ağırlık (MW)	-	30,000-80,000 (g mol ⁻¹)
Yoğunluk	-	1.41 (g cm ⁻³)
Camsı Geçiş Sıcaklığı	DSC	69-115 °C
Erime Sıcaklığı	DSC	265 °C
Kırılma kuvveti	Tensile	50 (Mpa)
Çekme dayanımı	-	1700 (Mpa)
Deformasyona uğrayabildiği en Düşük gerilme değeri	Tensile	4 (%)
Darbe dayanımı	ASTM D256-86	90 (J m ⁻¹)
Su absorpsiyonu (24 saat sonra)	-	0.5 (%)

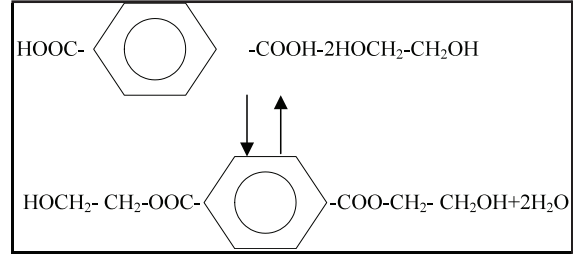
PET'ler kristal yapıdır, T_e = 265 °C, T_c = 80 °C ve 175 °C'ye kadar kullanışlıdır, asitlerden etkilenmez ve alkalilere karşı biraz duyarlıdır. PET'ler iki değerli bir organik asit ile iki değerli bir alkolün polikondenzasyonu ile elde edilirler.

PET üretimi için uygulanan üç yöntem vardır (Seventekin, 2003):

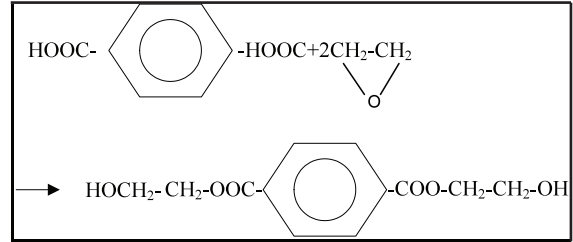
Dimetilentereftalat ve etilen glikol yöntemi :



Tereftalik asit ve etilen glikol yöntemi :



Tereftalik asit ve etilenoksidin yöntemi :



PET'in teşhis etme Kodu 1'dir, maksimum kullanılabilir sıcaklığı 60 °C'dir, PET, açık veya hafif renkli, yarısaydam, suda yüzebilir fakat köpük yapılamaz, 250 °C gibi yüksek erime sıcaklığına sahip bir plastiktir. PET hızlı yanar, alevleri renksiz, yanarken mum kokusu ve sönerken beyaz duman verir.

3. 1. Plastiklerin Tanımlanmasında Kullanılan Kodlar

1988 yılında yapılan uluslararası bir düzenlemeyle suların, yiyecek ve içeceklerin konduğu plastik kaplar birden yediye kadar numaralandırılmaktadır. Bu numaralar genellikle şişelerin tabanında üçgen şeklindeki geri dönüşüm ambleminin içine yazılmaktadır. Bu numaralar plastik şişenin hangi hammadde kullanılarak üretildiğini göstermektedir. Yine bu numaranın yer aldığı geri dönüşüm işaretinin hemen yakınılarında, genellikle şişenin üretiminde kullanılan plastiğin tipini gösterir bir kısaltma daha bulunmaktadır. Örneğin PET veya PETE kısaltmasını gördüğünüzde şişenin üretiminde polietilen tereftalat kullanıldığı anlaşılır. Bu maddeden üretilen şişeler 1 sayısı ile numaralandırılırlar. Bu numaraların anlamı Tablo 2'de sıralanmıştır:

Tablo 2. Geride Dönüşümde kullanılan kodlar (Sevencan, 2007).

Dönüş No	Kısaltma	Polimer	Kullanım
1	PETE-PET	Polietilen Tereftalat	Polyester fiberler, film, elyaf, şişe
2	YYPE-HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen	Taşınmaya elverişli kapların yapımı, şişe, çanta
3	PVC-V	Polivinil Klorür	Çit ve parmaklık malzemeleri, yiyecek dışı şişeler
4	LDPE	Düşük Yoğunluklu Polietilen	Sera örtüsü, film, ambalaj, elektrik sanayi
5	PP	Polipropilen	Plastik şişe, mutfak eşyası
6	PS	Polistiren	Oyuncak, videokaset, tepsi, Yalıtım malzemesi
7	Diğer	Akrilik, polikarbonat, naylon ve diğer	

3. 2. Plastiklerin Sınıflandırılması

Plastikler sıcaklık karşısında gösterdikleri özelliklere göre iki gruba ayrılır.

3. 2. 1. Termoset Plastikler

Sıcaklıkla çapraz bağlanırlar ve geri dönüşü olmayan, sıcaklıkta tekrar yumuşamayan ve erimeyen, sert katı bir madde verirler ve bu özellikleri geri kazanılmalarını ve tekrar kullanılmasını mümkün kılmamaktadır. Ancak bazı termoset plastikler öğütülerek dolgu maddesi olarak kullanılabilirler.

3. 2. 2. Termoplastikler

Sıcaklıkta erimeleri, çözücüde çözünmeleri ve yeniden şekil alabilmeleri sonucu tekrar geri kazanılarak defalarca kullanılabilirler. Termoplastiklerin geri kazanılabilenleri arasında en çok kullanılanları alçak ve yüksek yoğunluklu polietilen (deterjan ve şampuan şişeleri, motor yağı şişeleri, çöp torbaları), polipropilen (deterjan kutularının kapakları), polistiren (yoğurt ve margarin kapları), polivinil klorür (ambalajlar) ve polietilen teraftalat (su, meşrubat ve yağ şişeleri)'dir.

4. PLASTİKLERDE GERİ DÖNÜŞÜM

İlk PET geri dönüşüm projesi 1976 yılında St. Jude Polymers adında bir şirket tarafından başlatılmıştır. Kullanıcı tarafından kullanılıp atılan boş PET ambalajı PET atığı haline gelmektedir. Geri dönüşüm endüstrisinde bu post consumer PET olarak adlandırılır. POSTC-PET (Post consumer PET) veya r-PET (recyled PET)'in ilk geri dönüşüm işlemi 1977 yılında yapılmıştır. 1995'ten bu güne polyester, keçe endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat 1996 yılında polioleninler ve polipropilen oranı % 46, polyester oranı ise % 45 iken 1998 sonunda bu oranlar, olefin elyafı % 49, polyester ise % 42 şeklinde değişmiştir (Anon., 2009e).

4. 1. Plastiklerin Temin Edilmesi

Geri dönüşümün gerçekleştirilebilmesi için ilk olarak plastiklerin temin edilmesi gerekmektedir. Plastik atıklar, kaynaklarına göre proses atıkları ve kullanım sonrası atıklar olarak iki sınıfta gruplandırılabilir (Tan v.d., 2007).

Proses atıkları, plastik fabrikaları ve imalathanelerinde üretimler yapılırken üretilen malzemelerin çapaklarının alınması veya üretim hatasından kaynaklanmaktadır. Bu şekilde oluşan atıklar toplam üretimin % 10'u civarındadır ve genel olarak temizdirler.

Kullanım sonrası atıkları sektörlere göre incelemek gerekmektedir. Bunlar, kentsel atıklar (süpermarketler, alış-veriş merkezleri ve ev atıkları v.b), ambalaj, ziraat, otomotiv, inşaat ve elektrik-elektronik atıkları olarak sınıflandırılabilir. Aynı zamanda geri kazanılması düşünülen plastikler, sanayi tesislerinde çıkan, ticari merkezlerde oluşan,

tarımda kullanılan, belediye çöplüklerinde oluşan ve evlerde kullanılan plastikler atıklar gibi kaynaklardan da temin edilebilmektedirler.

Plastik atık geri kazanımı 4 yöntemde gerçekleşir (Tan v.d., 2007).

- Birincil Geri Kazanım: Birincil geri kazanım yönteminde atık plastikler mekanik kısıcılarla boyutlan küçültülür ve orijinal plastiklerle karıştırılıp tekrar işlenir.
- İkincil Geri Kazanım: Atık plastikten orijinal polimerden elde edilen ürüne eşdeğer olmayan ikincil kalitede mamul üretimine yönelik geri kazanımdır.
- Üçüncül Geri Kazanım: Kimyasal geri kazanım olarak da tarif edilmektedir. Temel amaç atık plastiklerden, plastiğin üretildiği polimerin monomerini, orijinal polimerini ve diğer amaçlar için kullanılmak üzere çeşitli kimyasal maddelerin üretilmesidir.
- Dördüncül Geri Kazanım: Plastik atıklardan ısı geri kazanmak için yapılan bir yakma işlemidir. Burada plastik atıklar yakılarak enerjisinden faydalanılmaktadır.

4. 2. Pet Şişelerin Geri Kazanımı

Şekil 2'de belirtildiği gibi Pet şişe geri kazanım işlemleri fiziksel ve kimyasal yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır.

4. 2. 1. Pet Şişelerin Fiziksel Geri Kazanımı

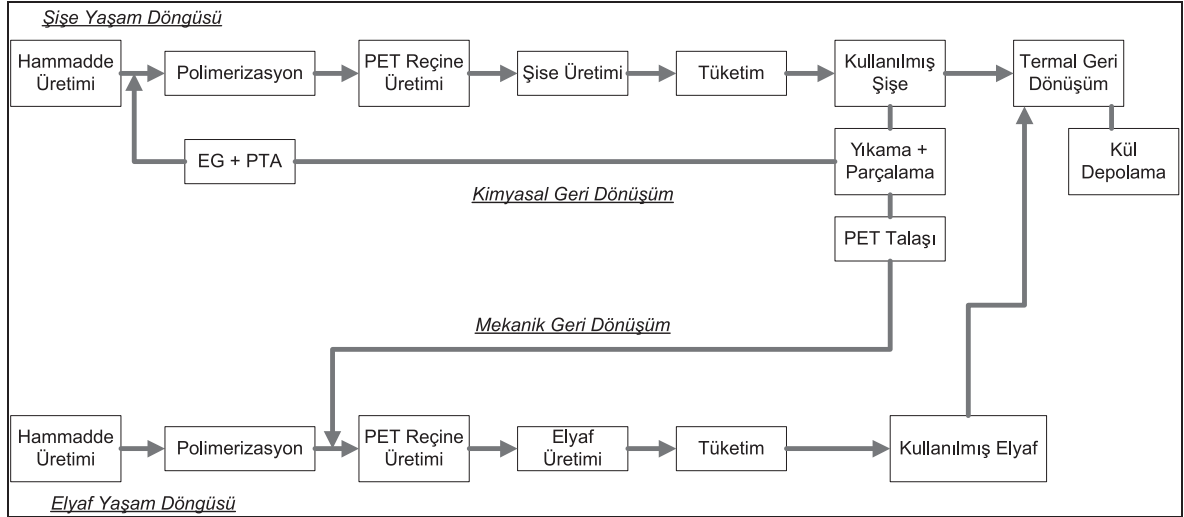
Fiziksel geri kazanım işlemlerinde PET şişelere uygulanan işlemler sırasıyla Şekil 3'de gösterilmiştir.

4. 2. 1. 1. Ayrıştırma İşlemi

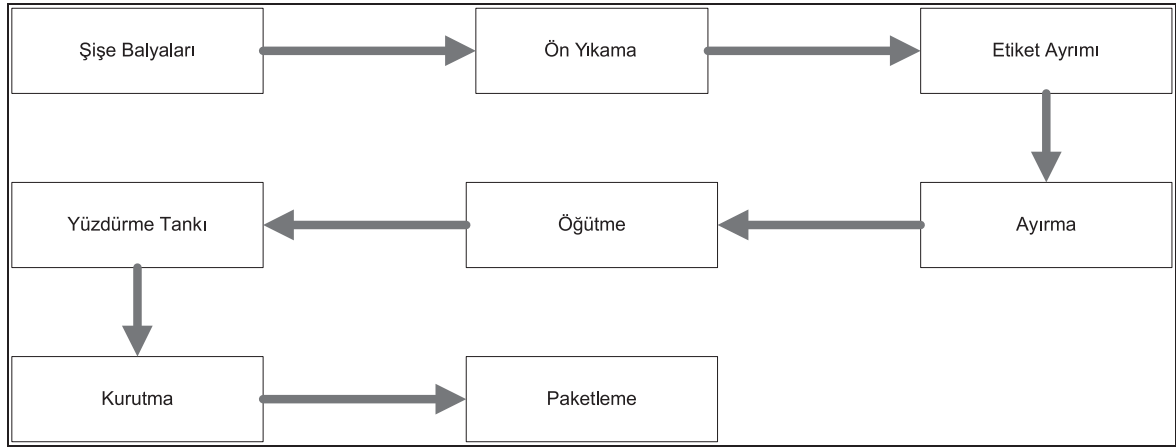
Toplanan plastik atıkların ayrılmasındaki amaç; geri kazanılan plastiğin mümkün olduğunca saflıkta ve değişmeyen özelliklerde elde edilmesidir (Anon., 2009e). Burada önemli iki husus bulunmaktadır. Bunlardan biricisi PET şişelerin içerisinde başka bir plastiğin bulunmamasıdır. Çünkü, uygulanan işlemler bir başka plastiğe uygulanmayabilir. Bu da daha sonraki işlemlerde büyük sorunların oluşmasına neden olacaktır. İkincisi ise PET şişe renklerinin üretilen mamule göre farklı olmamasıdır.

4. 2. 1. 2. Yıkama-Kırma İşlemi

Kirli ürünler, sulu kırma makinesi yardımı ile parçalanarak yıkama hattına alınmaktadır. Yıkama hattının ilk havuzunda atıklar üzerindeki toz, çamur v.b. yıkanarak temizlenmektedir. Kırma işlemi genellikle yıkama işlemine paralel gelişmektedir. PET sert bir malzeme olduğu için PET bıçakları çabuk yıpranır. Bu nedenle PET şişenin ön yıkamadan geçmesi veya ıslak kırılması malzemenin üzerindeki toz oranını azalttığı gibi kırma bıçaklarının ömrünü de uzatır.



Şekil 2. Pet şişelerin geri kazanım döngüsü.



Şekil 3. Pet şişelerin fiziksel geri kazanım.

Kırma işleminden sonra çapaklar asıl yıkamaya girer. Etiket, kapak gibi plastik ve kağıt dan ayrıştırma burada yapılır.

4. 2. 1. 3. Durulama ve Kurutma İşlemi

Kimyasallarla yapılan işlemlerden sonra parçalanmış plastik bir durulama işlemine tabi tutularak daha hijyenik hale getirilmektedir. PET üreticileri 140-170 °C'de 3-7 saat arasında değişen kurutma işlemleri uygulamaktadırlar. Tipik işletme şartlarında PET parçacıklarında % 0,02'den fazla suya izin verilmez ve bu oranda su içeriği sağlamak için PET, 170 °C'de 6 saat kurutma işlemine tabi tutulmaktadır (Anabal, 2007).

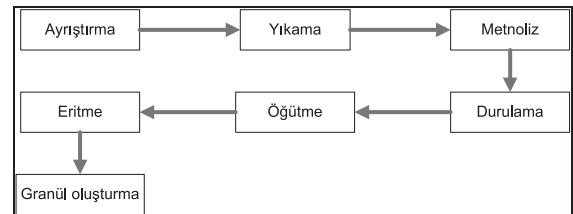
4. 2. 1. 4. Kesim İşlemi

İsteğe göre oluşacak ürüne göre kesim işlemi yapılmaktadır. Sonuçta PET talaşı olarak isimlendirilen geri dönüştürülmüş malzeme elde edilir.

4. 2. 1. 5. Komple Geri Dönüşüm Hatları

Atık plastiklerin geri kazanımı için komple geri dönüşüm hatları; kirli plastiğin su tanklarında veya

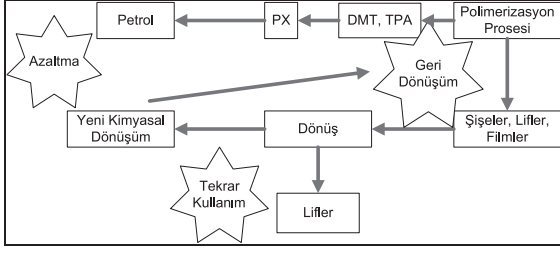
tamburlu yıkama makinelerinde yıkanıp temizlenmesi, öğütülmesi, kurutulması, eritilerek granül halindeki plastik hammaddeye dönüştürülmesi aşamalarını kapsamaktadır (Anon., 2009d). Şekil 4'de komple geri dönüşüm hattında uygulanan işlemler gösterilmiştir.



Şekil 4. Komple geri dönüşüm hattı.

4. 2. 2. PET Şişelerin Kimyasal Geri Kazanımı

Şekil 5'de PET Şişelerin kimyasal geri dönüşümünde uygulanan işlemler gösterilmiştir.



Şekil 5. Kimyasal geri dönüşüm.

4. 2. 2. 1. Aminoliz

Farklı aminler kullanılarak PET atıklarının depolimerize edilmesi olarak tanımlanmaktadır. Elde edilen ürünler özellikle epoksi ve ürethan reçine sektöründe kullanılmaktadır. Ancak yaygın ticari uygulaması yoktur.

4. 2. 2. 2. Amonoliz

Genellikle etilen glikol ortamında, susuz amonyak kullanılarak işlem gerçekleştirilmektedir. Teraftamid'den elde edilen diaminler çeşitli poliamidlerin eldesinde kullanılmaktadır.

4. 2. 2. 3. Metnoliz

PET basınç altında ve 200 °C'de metanol ile işleme sokulmaktadır. Bu, molekülün depolimerizasyonuna neden olur. Meydana gelen ürünler dimetiltereftalat ve etilenglikoldür. DMT destilasyon ve kristalizasyon ile saflaştırılır ve tekrar PET üretimi için kullanılabilir hale gelir. Bir kere saflaştırılmış etilen glikol antifreeze ve PET üretimi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilir.

4. 2. 2. 4. Hidroliz

PET su ve asit veya baz işlemleri vasıtasıyla hidrolize edilir. Böylece tereftalik asit ile etilen glikol elde edilir. Bunlar tekrar kullanımlarından önce saflaştırılmalıdır. Ticari hidroliz glikoliz ve metnoliz göre fazla uygulama alanı bulamamıştır.

4. 2. 2. 5. Sabunlaştırma

PET alkali ile hidrolize edilir. Ticari olarak şimdiye kadar iki sistem geliştirilmiştir. Bunlar Recopet (France) ve Unpet (USA). Recopet PET flakelerin sabunlandığı ve filtre edildiği çok aşamalı bir prosestir. Boyalar tereftalik asit çökmeden önce ekstrakte edilir. Ayrıca sodyum sülfat ile etilenglikol de ekstrakte edilir. Unpet'te ise etilen glikol ve disodyumtereftalat elde edilir.

4. 2. 2. 6. Piroliz

Mixed-stream thermoset polimerler oksijen yokluğunda ve yüksek sıcaklıklarda bozukturulur. Naftaya benzer hidrokarbon karışımları elde edilir. Piroliz ticari olarak gelişmemiştir.

Tablo 3'de kimyasal geri dönüşüm yöntemlerinin uygulanabilirliği ve ekonomik rekabet edebilirliği gösterilmiştir.

Tablo 3. Kimyasal geri dönüşüm yöntemlerinin uygulanabilirliği.

Yöntem	Üretim Maliyeti	Ekonomik Rekabet Edebilirlik	Uygulama
Hidroliz	Yüksek	Yüksek Kapasitede	Endüstriyel olarak uygulanmakta
Metnoliz	Yüksek	Yüksek Kapasitede	Endüstriyel olarak uygulanmakta
Glikoliz	Orta - Düşük	Küçük Kapasitede	Endüstriyel olarak uygulanmakta
Aminoliz	Düşük	Küçük Kapasitede	Endüstriyel olarak uygulanması bulunmamakta
Amonoliz	Düşük	Ürüne Bağlı	Endüstriyel olarak uygulanması bulunmamakta

4. 2. 3. Geri Dönüştürülmüş PET'lerin Kullanım Alanları

Plastik (PE, PP, PET, PVC, PS) ikincil ürün imalatında hammadde olarak; plastik torba, marley, pis su borusu, elyaf dolgu malzemesi ve sera örtüsü imalatı ile otomotiv sektöründe özellikle Kompozit malzeme olarak kullanılmaktadır (Anon., 2006).

- Çeşitli amaçlı bantlar, Dolgu Malzemesi, Kartvizitler, banka kartları, v.b.
- Araba parçaları, tamponlar, paneller, v.b.
- Halılar, Kumaş Üretimi, Giysiler, döşemelikler, v.b.
- Yumurta kartonları, Temizleme bezleri, Boya fırçası kılıkları, Yalıtım.

4. 2. 4. Tekstilde Geri Dönüşüm PET'in Kullanımı

Dünyada geri kazanılmış PET'in % 80-85 oranında polyester elyaf üretiminde kullanıldığı tahmin edilmektedir. Polyester elyaf pamuğun alternatifi olduğu için; pamuğun yıllık ürün miktarının çok düşük olduğu yıllarda çok talep gören ve fiyatı çok yükselen bir metadır. Ülkemiz bir tekstil ülkesi olduğu için Adana, Gaziantep, Bursa, Uşak gibi şehirlerde geri dönüştürülmüş PET çapaktan elyaf üretebilecek ciddi tesisler faaliyetini sürdürmektedir. Dünyada polyester üretim merkezi ise Çin'dir. Nitekim Türkiye'de geri dönüşüm tesislerinin çoğu Çin'de bulunan tesislere PET çapak ihraç etmektedirler (Anabal, 2007).

r-PET eklenmiş polyester elyaf üretiminde; ilk olarak kırılmış PET parçalarının (yaklaşık % 52'si atık PET) nemleri alınması için kurutuculara verilmektedir. Kurutulmuş PET'ler ekstrüzyon ünitesine iletilir. Burada yaklaşık 280 ile 300 °C'de eriyen PET çapaklar düzelerden geçirilerek elyaf iplik formunda, ilk olarak bir soğutma ünitesine verilmektedir. Elyafın tam katılaşması sağlanmaktadır. Filament halindeki elyaf demeti, statik elektriklenme özelliğinin azalması için bir yağ banyosundan geçirilmektedir. Daha sonra polimer zincirlerinin oryantasyonu için ön germe işlemine tabi tutulan elyaflar büyük kovalara doldurulmaktadır. Gerdirme makineleri arasında

tekrar bir yağ banyosundan geçirilen elyaf daha sonra bir buhar kazanına gönderilmektedir (Anabal, 2007). Bu işlemleri kırıştırma, kurutma ve kesme işlemleri takip etmektedir.

5. GERİDÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ PETHAKKINDA YAPILMIŞ BİLİMSEL ARAŞTIRMALAR

5. 1. Plastik Endüstrisinde Yapılan Çalışmalar

Avustralya'daki New South Wales Üniversitesi'nden Prof. Veena Sahajwalla, plastik atıkların çelik imalatında kullanılmasına olanak sağlayan projesi ile Avustralya'nın en prestijli bilim ödülünü kazanmıştır. Bu projenin ticari olarak hayata geçirilmesi ile plastik atıklar çelik imalatında kullanılan kok ve taş kömürünün yerine geçmesi sağlanacaktır. Günümüzde çelik imalatında, çeliğin dayanıklılığını artırmak için ihtiyaç duyulan karbon genellikle kok ve taş kömüründen elde edilmektedir. Ancak; Prof. Veena Sahajwalla'nın geliştirdiği projeye yüksek sıcaklıkta karbon açığa çıkaran plastiklerin, çeliğin dayanıklılığını artırmak için kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Projenin hayata geçirilmesiyle birlikte plastik atık miktarında büyük bir azalma gerçekleşeceği beklenmektedir. Özellikle katı atıkları düzenli bir şekilde bertaraf edebilmek için yeterli alanı bulunmayan ülkeler için plastik atık miktarının ve hacminin azalması büyük bir avantaj sağlayacaktır (Anon., 2007).

Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Michigan Üniversitesi'nden Nicholas Kotov, "kâğıt kadar ince, çelik gibi sağlam" plastik üretmiştir. Zehirli olmayan bir yapıştırıcıdan üretilen bu plastiğin doğada kolaylıkla parçalanabilmesi özelliğine sahip olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, bu plastiğin ekolojik olarak tanımlanabilmekte ve üretim maliyeti de yüksek olmamaktadır. İki yıl içerisinde de bu malzemenin kimya fabrikalarında gaz elemanlarını ayırmak için gereken enerji tüketimini azaltabileceği, mikro-çip ya da biomedikal sensör teknolojilerini iyileştirmekte, asker ve polisleri ve araçlarını korumak için daha güçlü ve daha hafif zırh üretmekte kullanılabilmesini belirtmiştir (Anon., 2007).

5. 2. Kompozit Üretimi Açısından Yapılan Çalışmalar

General Electric ve Mrc Polymers son yıllarda %50-%60 atık PET'den otomobil tamponları, otomobil tekerlek kapakları ve rüzgârlıklar üretmektedir (İyim, 1996).

Hon ve Buhion (1994) Kompozit malzemelerde, çeşitli karışım oranlarında PET ve HDPE'nin işlenebilirliğini araştırmışlardır. Mekanik özelliklerinin, maksimum yüklemeye gerilmelerinin ve elastikiyet modülünün istatistiksel olarak analizini yapmışlardır. Bunun yanında termo mekanik özelliklerini suchasstorage modülü ve kompozitin

kayıp modül değerlerini değerlendirmişlerdir. Ayrıca kompozitin uyumluluğunu elektron tarama mikroskobu ile incelemişlerdir. Sonuç olarak PET ve HDPE'nin Kompozit içinde uniform olduğu, mekanik olarak işlenebilirliği ve şekillendirilebildiği sonuçlarına varmışlardır. Farklı karışım oranlarında bu kompozitlerin maksimum yük altındaki gerilmelerinde önemli bir fark gözlenmezken Kompozit malzemenin içinde Pet oranı arttığı zaman maksimum yük altında zorlanma yüzdesinin düştüğü ortaya çıkmıştır. PET oranı artışı elastikiyet modülünün artmasına da katkı sağladığı ortaya çıkmıştır. DMTA verileri ve SEM mikroskobu PET ve HDPE arasındaki etkileşimin önemsiz ve uyumlu olduğunu göstermiştir.

Rebeiz ve Fowler, (1994) ve arkadaşları geri dönüşümlü PET'ten üretilmiş polyester takviyeli betonların bükülgenlik özelliklerini araştırmıştır. Araştırmaları sonucu betonda aşırı sıkıştırma yükü değeri 0.005 ya da üzeri olursa takviye PC, kırışlarda geri dönüşümle pet oranına bağlı olarak doymamış polyester reçinesi bükülgenlikte hata ortaya çıkmıştır. Kırışlara uygulanan yükler, sıkıştırma bölgesi üzerinde yük oryantasyonu neredeyse mükemmel doğrusalılıkta olduğu sonucuna varmıştır. Betonun dayanıklılığını ve yumuşaklığını arttırmak için kırışta sıkıştırma oranı en az % 1.7 olması ise ortaya çıkan bir başka sonuçtur.

Kawamura ve arkadaşları geri dönüştürülmüş PET'ten kaplama reçinesi yapmayı amaçlamışlardır. Bunun nedeni r-PET'in Amerika, Avrupa ve Japonya'da daha çok lif veya film alanında kullanımının daha yaygın olmasıdır. r-PET etilen glikol ve tereftalik asitin kondezyasyonundan oluştuğu için bu iki monomerin kaynağı olarak düşünmüşler ve r-PET'i polihidrik alkol monomeri ve dibasic asit monomerleri ile polikondezyastona soktuklarında ters polimerizasyon ile etilen glikol ve tereftalik asit elde etmişlerdir. Sonucunda ise elde edilen etilen glikol ve tereftalik asitten sentezlenenene toz kaplama ile klasik poliesterden elde edilen sıradan etilen glikol ve tereftalik asitten üretilen toz kaplama ile aynı karakteristik özelliklere sahip olduğu ortaya çıkmıştır (Kawamura v.d., 2002).

5. 3. PET Geri Kazanımı Açısından Yapılan Çalışmalar

İyim, (1996) çalışmasında, fenol içerisinde PET'in homojen ortamda hidroliz edilebildiğini göstermiştir. Ancak çalışması, ksilen içerisinde yapılan çalışmaya oranla her hangi bir üstünlük sağlayamamıştır. PET, fenolik reçinelere üretimleri esnasında veya üretilikten sonra katılarak belirli bir orana kadar homojen karışımlar hazırlanabilmekte, hegzametilene tetraminle karşıt bağlanma esnasında faz ayrımı gözlenmediği sonucuna varmıştır. Ayrıca PET tozunun hegzametilene tetraminle birlikte

kalıplanmasında gösterdiği kauçuksu davranış, termoset matris içerisinde dispers kauçuk veya belirli bir oranda girişimli şebekeler oluşumuna işaret etmektedir. Genelde kalıpların, karışım ve reaksiyon ürünlerinde düşük miktarda PET bulunması basınç dayanımını artırmakta, yüksek oranda kullanım ise büzülmeyi artırarak yapının daha elastik davranış göstermesini sağlaması da elde ettiği sonuçlardan biridir. TDI yüksek sıcaklıkta ksilen içerisinde polyester yapıyı parçalayarak üretilen yapı içeren ara ürünler oluşturmakta bunlar polioller içerisinde çözünebilme ve TDI ile tekrar reaksiyona sokularak nitelikli filmler elde edilebileceği sonuçlarına varmıştır.

Masaiko, (2005) araştırmaları kapsamında PET şişenin mekanik geri dönüşümü yöntemi ile 1.246 kg/lık PET şişe balyasından 1 kg PET talaşı, kimyasal geri dönüşüm yöntemi ile 1.133 kg/lık PET şişe balyasından 1 kg PET polimer elde edildiğini tespit etmişlerdir. Böylelikle 1 kg PET üretmek için kullanılan doğal kaynaklar tüketilmez ve kullanım sonrası oluşan ambalaj atıkları değerlendirilerek çevre kirliliği yaratılmamış olur.

Hassani v.d., (2005) ve arkadaşları polietilen tereftalattan üretilen çok miktarda şişeden oluşan evsel atıklar ve çöp sahalarının yüksek hacimleri nedeniyle 1 milyon m³ ten fazla depo alanı bertarafı düşüncesinden yola çıkarak yeni bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada agrega yerine asfalt beton karışımında PET atıkları kullanılarak PET'in çevreye olan olumsuz etkilerinin azaltılabileceği düşünülmüştür. Çalışmada kullanılan atık PET'ler yaklaşık 3 mm çapında granül formunda kaba maden kısmı yerine eşit büyüklükte agrega olarak kullanılmaktadır. Sonucunda; kaba agreganın % 20'si yerine PET granülleri eklenmesiyle asfalt ve köprü yapımında kullanılan plasipalat karışımının birim ağırlığının % 2,8 azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca asfalt kaplamanın en önemli bileşeni olan agrega, 1 km yol yapımı için 12.500 ton gerekmektedir. Bu çalışma sonucunda % 5 agrega yerine 315 ton PET kullanıldığında 625 ton doğal kaynağın korunması sağlanmış olmaktadır. Böylece bu PET şişeleri yerleştirmek için gerekli olan 9450 m³ depo alanına gerek olmayacaktır. Uygulan testler sonucunda eklenen PET miktarı yüzdesinde artışla bağlantılı olarak Marshall Stabilesinin azaldığı, akışkanlığının arttığı ve yoğunluğunun azaldığı gözlenmiştir.

Küçükgül ve Kırşen (2007) çalışmasında; PET şişenin üretim aşamalarını, bu proseslerdeki tüketimleri ve oluşan emisyonlarının envanterini oluşturmaya çalışmışlar, sonucunda kütle denkliliği incelendiğinde 1 adet PET şişe üretimi için yaklaşık olarak 1,2 kg ham petrol kullanıldığı, ham petrolün çıkarılmasının su tüketimi kuyuya bağlı olduğu ve tam olarak bilinmediği için en az 65 lt su tüketildiği, yine ham

petrol arama ve çıkartma işlemlerinde tüketilen elektrik miktarı bilinmemesine rağmen en az 200 wh'lık elektrik tüketildiği hesaplanmıştır. Bu değerler de üretim prosesindeki tüketimler olup transfer, taşıma, atıksu arıtımı, atıkların bertarafı v.b. işlem adımlarındaki tüketimler dikkate alınmıştır.

Anabal, (2007) çalışmasında, PET atıkların geri dönüşümünde istenmeyen madde PVC'nin ayrılma teknikleri irdelerek, elektrostatik yöntemle PET ve PVC ayrılmasına çalışmıştır PET'in çözücüsü olan fenol ve fenol tetrakloretan karışımı ve PVC'nin çözücüsü dimetil amin ve benzil alkol kullanılarak, PET ve PVC çözümlülük özelliklerinden yararlanılarak ayrılmasına çalışmıştır. Sonuç olarak PET ve PVC karışımında en iyi çözünme yüzdesini, % 12,83 çözünme yüzdesi ile bencil alkol bulmuştur. PET'in tek basına çözünmesi istendiğinde ise % 68,46 çözünme yüzdesi ile % 60'lık 1.1, 2.2 tetrakloretan ve % 40'lık fenol çözücüsü en iyi sonucu vermiştir. Buradan PET için % 60'lık 1.1, 2.2 tetrakloretan ve % 40'lık fenol karışımını, çok mükemmel olmamakla birlikte, cevap veren bir çözücü karışım olduğu gerçeği ortaya çıkmıştır. PET ve PVC örneklerinden oluşan karışım, kurulan düzeneğe yardımıyla yüklerine bağlı olarak elektriksel alanın etkisiyle pozitif ve negatif elektroda saptırılmıştır. İstenen ayırımı net bir şekilde gözlemiş olup, PVC verimi % 70 ve PET verimi % 56,6 olarak hesaplanmıştır. Buradan PVC'nin elektrostatik ayırımı PET'ten daha fazla cevap verdiği gerçeğine varmıştır. Böylece atık plastik geri dönüşümünde; elektrostatik yöntem PET ve PVC'nin karışımından PVC uzaklaştırılmasında etkili bir yöntem olma potansiyelini göstermiştir.

5. 4. Tekstil Alanında Yapılan Çalışmalar

Abbasi ve Mojtahedi (2004) şişeden üretilen filament ipliklerin yapısal ve fiziksel özelliklerinin eğirme hızına etkisini incelemişlerdir. Saf PET cipsi ve PET şişeden, 2500 m/dk ve 3000 m/dk eğirme hızında üretilen devamlı filamet ipliklerin Birefringence, kristallik, dayanım, kopma uzaması çekme modülü değerlerini karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında, filament ipliklerin eğrilmesi için pilotlu eğirme makinesinde, eğirme sıcaklığını da 275 °C' kullanmışlardır. PET'in viskozitesini 40/60'lık 1.1-2.2 fenol ve tetraklor etilen karışımı kullanarak ASTM D4-603 standartlarına göre oluşan filamentin amorf ve kristalin bölgenin yoğunluğu sırasıyla P_{am} : 1.355g/cm³ P_c : 1.478 g/cm³'tür. Uygulanan testler sonucunda saf PET ve test numunesinin değerleri karşılaştırıldığında; 2500m/dk-3000m/dk üretilen numunelerin Saf PET'e göre yüksek yoğunluk ve kristallik değeri gözlenmiştir. Ayrıca yüksek üretim hızının ipliklerin oryantasyonu ilişkili olduğu fakat başlangıç modülü ve çekme sonuçları ise kristallik tarafından desteklenecek kadar mükemmel olmadığı sonuçları ortaya çıkmıştır.

6. SONUÇ

Sanayiden kaynaklanan çevre kirliliğini oluşturan atık miktarları eğitim, planlama, iyi yöneticilik, devlet denetimi ve çevre koruma için parasal kaynak oluşturmakla en aza indirgenebilir, fakat tamamen yok edilemez. Ancak hem doğal kaynak israfı hem atık sorunun azaltılırken diğer yandan ekonomik girdileri artırılabilir.

Gelişen çevre bilincine paralel olarak çevrenin korunması bütün dünyada ülkelerin temel politika öncelikleri arasında giderek ön sıralara yerleşmekte ve atık yönetimi de çevre koruma politikaları arasında ağırlıklı bir yer tutmaktadır. Doğal kaynakların hızla tüketilmesinin önüne geçilmesi ve üretilen atıkların çevre ve insan sağlığı için bir tehdit olmaktan çıkarılarak ekonomi için bir girdiye dönüştürülmesini amaçlayan atık yönetim stratejileri, tüm dünyada giderek öncelikli bir politika hedefi olarak benimsenen "sürdürülebilir kalkınma" yaklaşımının temelini oluşturmaktadır.

Özellikle son yıllarda atık PET şişelerin geri dönüşümü ve uygulama alanlarının araştırmaları yapılmıştır. Bu makalede PET geri dönüşümü, bunu sağlayan makineler ve geri dönüştürülmüş PET'lerin kullanım alanları ve yapılan araştırmaların sonuçları incelenmiştir.

Araştırmalardan da anlaşılacağı gibi PET geri kazanımının en fazla kullanıldığı alanlar Kompozit malzeme üretimi ve plastik endüstrisidir. Tekstil sektöründe ise çok fazla araştırma bulunmamaktadır. Tekstil sektöründe geri dönüştürülmüş PET çok farklı kullanım alanları bulabilir, r-PET kullanılarak üretilmiş çeşitli ürünlerin kullanım performansının araştırılması yapılması planlanan araştırmalardandır.

7. KISALTMALAR

BHET	:	bis-(2-hidroksietil)-tereftalat
DMT	:	dimetiltereftalat
HDPE	:	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
LDPE	:	Düşük Yoğunluklu Polietilen
PET	:	Polietilen Tereftalat
POSTC- PET, rPET	:	Post consumer PET, recycled PET
PP	:	Polipropilen
PS	:	Polistiren
TDİ	:	2,4 diizosiyonat
TPA	:	Tereftalik asitten
PVC	:	Polivinil Klorür

KAYNAKLAR

- Abbasi, M. and Mojtahedi, M. R. M. 2004. Effect of spinning speed on the structure and physical properties of filament yarns produced from used PET bottles. 3rd International Conference of Czechoslovakia.
- Anabal, F.Y. 2007. PET Atıkların Endüstride Değerlendirilmesi, Gazi Üniversitesi, FBE Çevre Bilimleri Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Anonim, 2006. "Burdur İl Çevre ve Orman Müdürlüğü-Uygulamalı Çevre Eğitimi Projesi" <http://www.burdur-cevreorman.gov.tr/CEVRE/bunlaribiliyormusunuz.htm>.
- Anonim, 2007. "Aralık Bülteni", www.tepro.com.tr.
- Anonim, 2009a. www.cevreonline.com.
- Anonim, 2009b. http://www.cevreorman.gov.tr/atik_01.htm.
- Anonim, 2009c. Wikipedia, özgür ansiklopedi http://tr.wikipedia.org/wiki/Polietilen_tereftalat.
- Anonim, 2009d. <http://www.netplasmak.com/>.
- Anonim, 2009e. Polyester ve Özellikleri http://www.tekstilokulu.com/FORUM/forum_posts.asp?TID=152.
- Hassania, A., Ganjidoust H. and Maghanaki, A. 2005. Use of plastic waste in asphalt concrete mixture as aggregate replacement. Waste Management and Research. (23), 322-327.
- Hon, D.N.S. and Buhion, C.J. 1994. Processability and compatibility of polyethylene terephthalate and high-density polyethylene from post consumer wastes. Journal of Thermoplastic Composite Materials. (7), 4.
- İyim, T. B. 1996. Polietilen tereftalat atıkların veya ara ürünlerin fenolik reçinelerde ya da poliüretanlarda kullanımı. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi FBE, İstanbul.
- Kawamura, C., Ito, K., Nishida, R., Yoshihara, I. and Numa, N. 2002. Coating resin synthesized from recycled PET. Progress in Organic Coatings. (45), 185-191.
- Küçükgül, E.Y. ve Kırşen Doğan, S. 2007. "Yaşam Çevre Teknoloji-Pet Şişenin Yaşam Döngü Analizi" 7. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi.
- Masaiko, H. 2005. LCA as A Component of Configuration Engine for KIH.
- Rebeiz, K.S. and Fowler, D.W. 1994. Flexural properties of reinforced polyester concrete made with recycled PET. Journal of Reinforced Plastics and Composites. (13), 895.
- Sevencan, F. 2007. Pet ve geri dönüşüm makalesi. TSK Koruyucu Hekimlik Bülteni.
- Seventekin, N. 2003. Kimyasal lifler. E.Ü. Tekstil ve Konfeksiyon Araştırma Merkezi Yayını.
- Tan, E., Tarakçılar, A. R. ve Yurtseven, R. 2007. 'Plastik Geri Kazanımları ve Plastik Atıklardan Plastik Üretim Teknolojileri'<http://www.metalduyasi.com/tr/dergi.asp?id=595&dergi=buay>.