




Polivinil klorür (PVC)'ün geri dönüştürülmesi: PVC köpük üretimi ve Karakterizasyonu

Recycling of polyvinyl chloride (PVC): production and characterization of PVC foams

Yıldız BİRBİLEN¹ 
Kadir KARAKUS¹ 
Fatih MENGELOĞLU¹ 

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi,
Orman Fakültesi, Kahramanmaraş

Sorumlu yazar (Corresponding author)

Yıldız BİRBİLEN
yildizbrbln@gmail.com

Geliş tarihi (Received)

30.03.2022

Kabul Tarihi (Accepted)

27.06.2022

Sorumlu editör (Corresponding editor)

Samet DEMİREL
sdemirel@ktu.edu.tr

Atıf (To cite this article): Birbilen, Y. , Karakus, K. & Mengeloğlu, F. (2022). Polivinil klorür (PVC)'ün geri dönüştürülmesi: PVC köpük üretimi ve Karakterizasyonu . Ormanlık Araştırma Dergisi , Karok 2021 , 336-341 . DOI: 10.17568/ogmoad.1095629



Creative Commons Atıf -
Türetilemez 4.0 Uluslararası
Lisansı ile lisanslanmıştır.

Öz

Plastikler hayatımızın birçok alanında yıllardır kullanılmakta olup kullanım ömrü sonunda önemli miktarda atık oluşturmaktadır. Doğada uzun yıllar bozunmadan kalan ve çevreye zarar veren bu malzemelerin geri dönüştürülüp tekrar kullanıma kazandırılması önem taşımaktadır. Termoplastik köpük malzemeler düşük yoğunluk, yüksek spesifik mukavemet, yüksek enerji absorblama özellikleri ve üstün yalıtım özelliklerinden dolayı ısı yalıtımı, otomotiv koltukları, ambalaj malzemeleri ve enerji absorblayıcı (soğurucu) malzemeler olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, en çok kullanılan plastiklerden biri olan ve önemli miktarda atık oluşturan polivinil klorür (PVC)'ün geri dönüşüm yoluyla termoplastik köpük malzemelerin üretiminde kullanımı amaçlanmıştır. Bu amaçla kapı ve pencere profil atıklarından elde edilen atık PVC kullanılarak termoplastik köpük malzemeler üretilmiştir. PVC köpük malzemelerin bazı fiziksel, mekanik ve morfolojik özellikleri üzerine kimyasal köpük oluşturuç miktardının etkisi incelenmiştir. Üretilen PVC köpük malzemelerde kimyasal köpük oluşturuç malzeme miktarının artması ile PVC köpüklerin yoğunluk değerlerinde %40'lara kadar bir azalma sağlanmıştır. PVC köpüklerin spesifik darbe direnci değerleri kimyasal köpük oluşturuç miktarı ile doğrusal bir şekilde artış göstermiştir. Köpüklerin hücre yapısı incelendiğinde ise kimyasal köpük oluşturuç miktarının artması ile hücre birleşmelerinin meydana geldiği ve daha büyük hücrelerin oluştuğu gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Atık polivinil klorür, termoplastik köpük malzeme, kimyasal köpük oluşturuç, darbe direnci.

Abstract

Plastics have been used in many areas of our daily lives for years generating large amount of post-consumption wastes. It is important to recycle and reuse of these materials since they remain without degrading for many years causing harm to the environment. Thermoplastic foams are widely used as thermal insulation, automotive seating, packaging, furniture and energy absorbing materials due to their low density, high strength/weight ratio, high energy absorption performance and superior insulation properties. In this study, potential usage of polyvinyl chloride (PVC), one of the most used plastics, in the manufacture of PVC foams were aimed. For this purpose, thermoplastic foam materials were produced by using waste PVC obtained from door and window profile wastes. The effect of chemical foaming agent amount on the some physical, mechanical and morphology properties of PVC foams were investigated. According to the obtained results, the use of foaming agent provided up to 40% reduction in the density of PVC foams. With chemical foaming agent amount were increased specific impact strength values of PVC foams. Cell structure of foams was also investigated and an increase in cell coalescence with the increase of chemical foaming agents was observed.

Keywords: Waste polyvinyl chloride, thermoplastic foam, chemical foaming agent, impact strength.

1. Giriş

Termoplastik polimerler hayatımızın birçok alanında yaygın olarak kullanılmakta ve kullanımı her geçen gün artmaktadır. En fazla kullanılan termoplastik polimerler polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS) ve polivinil klorür (PVC)'dür. Bu malzemelerin kullanım ömrü sonunda uzun yıllar doğada bozunmadan kalması ve neden olduğu çevresel etki büyük bir endişe kaynağıdır. Bu problemle başa çıkmak için ya biyolojik olarak bozunabilen polimerlerin kullanımının yaygınlaşması ya da bu termoplastik polimerlerin geri dönüştürülmesi gerekmektedir (Zheng ve ark., 2005).

Termoplastik malzemelerin geri dönüşümü, depolama alanlarına gönderilen plastik atık hacminin azaltılması ihtiyacı ve yenilenemeyen petrol kaynaklarının korunması gibi çeşitli yönlerden önemli ve güncel bir konudur (Fried, 2014). Hammadde verimliliği ve organik kirlilik konusu göz önüne alındığında atıkların yakılarak bertaraf edilmesi tercih edilebilir bir seçenek haline gelse de atıkların geri dönüşümünün en avantajlı seçenek olduğu düşünülmektedir (Rigamonti ve ark., 2014). Çünkü termoplastik atıkların açık alanda yakılması da önemli bir hava kirliliği kaynağıdır. Yakma işlemi sırasında dioksinler, furanlar, cıva ve poliklorlu bifeniller gibi zehirli gazlar atmosfere salınmaktadır. Ayrıca polivinil klorür yapısında bulunan klor atomlarından dolayı ısı etkisi ile hidroklorik asit (HCl) açığa çıkarmakta ve bu gaz solunum sistemi başta olmak üzere insan ve hayvan sağlığı için tehdit oluşturmaktadır (Verma ve ark., 2016).

PVC atıkların geri dönüştürülmesinde iki yol izlenebilir. Birincisi atık malzeme temizlenerek ayrıştırma işlemine tabi tutulmaksızın aynı veya başka amaçla orijinal halinde kullanılabilir. İkincisi ise PVC malzeme parçalandıktan sonra ısı ve basınç altında yeni ürüne dönüştürülüp yeniden kullanıma kazandırılabilir (Titow, 2012).

Termoplastik polimer köpükler düşük yoğunluk, yüksek spesifik mukavemet, yüksek enerji absorblama özellikleri ve üstün yalıtım özelliklerine sahiptir. Mobilya, otomotiv koltukları, yalıtım malzemeleri, ambalaj malzemeleri ve enerji absorblayıcı malzemeler olarak birçok alanda tercih edilmekte ve kullanımı tüm dünyada hızlı bir şekilde artmaktadır (Nawaby ve Zhang, 2004; Demir ve ark., 2008; Shakarami ve ark., 2013). Termoplastik köpük malzemelerin üretiminde fiziksel ve kimyasal köpük oluşturuçular kullanılmaktadır. Fiziksel köpük oluşturuçular genellikle aromatik, alifatik veya halojenli hidrokarbonlar, eterler, ketonlar ve ekstrüzyon koşullarında gaza dönüşen alkol gibi düşük kaynama noktasına sahip uçucu

sıvılardan oluşur. Karbondioksit ve azot en yaygın kullanılan fiziksel köpük oluşturuçulardır. Kimyasal köpük oluşturuçular malzemeler ise sıcaklık ve basınç altında gaz oluşturmak üzere bozulan katı veya sıvı bileşiklerden oluşmaktadır. Kimyasal köpük oluşturuçular endotermik ve ekzotermik kimyasal köpük oluşturuçular olarak iki sınıfa ayrılır. En yaygın endotermik kimyasal köpük oluşturuçular sodyum bikarbonat, ekzotermik kimyasal köpük oluşturuçular ise azodikarbonamittir (Vachon ve Gendron, 2005). Bu köpük oluşturuçular birbirini tamamlayıcı özelliklere sahip olduklarından dolayı birlikte de kullanılabilirler (Eaves, 2001).

Sodyum bikarbonat geniş bir sıcaklık aralığında (150-230 °C) bozunur ve bozunma ürünleri karbondioksit ve su buharıdır. Gaz verimi 100-150 cm³/g'dır. Sodyum bikarbonatın avantajı, renk bozulmasına (sarımanın) neden olmaması ve böylece saf beyaz köpüklerin kolayca elde edilebilmesi ve açığa çıkan karbondioksitin kolaylıkla difüze olmasıdır. Dezavantajları arasında ise bozunma sırasında kalıp korozyonuna yol açabilen su buharının salınması ve düşük verimlilik nedeniyle yüksek maliyet yer almaktadır (Eaves, 2001).

Polivinil klorür (PVC), kapı ve pencere profilleri, otomotiv parçaları, borular, zemin kaplamaları, ambalaj malzemeleri, kablolar ve oyuncaklar gibi hayatımızın birçok alanında kullanılan en önemli plastikler arasında gelmekte (Fried, 2014) ve büyük miktarda atık oluşturmaktadır. Atık PVC'ün geri dönüştürülmesi ve kompozit üretiminde kullanılması ile ilgili birkaç çalışma bulunmaktadır. Augier ve ark. (2007) atık PVC ve odun ununu karıştırarak odun plastik kompozit üretmiş, Gohatre ve ark. (2021) ise atık PVC, atık akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve nitril kauçuk (NBR) kullanarak kompozit üretmiş ve özelliklerini incelemişlerdir. Zhang ve ark. (2021) bitki büyüme substratı olarak kullanım amacıyla atık PVC ve sodyum poliakrilatı karıştırarak termoplastik köpük malzeme üretmiş ve özelliklerini belirlemişlerdir.

Bu çalışmada, atık polivinil klorür (PVC)'ün geri dönüşüm yoluyla termoplastik polimer köpük malzemelerin üretiminde kullanımı amaçlanmıştır. Bunun için kapı ve pencere profil atıklarından elde edilen atık PVC kullanılarak kimyasal köpük oluşturuçular malzeme ile PVC köpük malzemeler üretilmiştir. Üretilen PVC köpük malzemelerin bazı fiziksel, mekanik ve morfolojik özellikleri üzerine köpük oluşturuçular kimyasal miktarının etkisi incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Polimer köpük malzemelerin üretiminde kullanılan pencere ve kapı profil atıklarının öğütülmesi

ile elde edilen atık polivinil klorür (PVC), AK-MAR Plastik Ltd. Şti. (Kahramanmaraş)'nden temin edilmiştir. PVC için plastikleştirici olarak kullanılan dioktil ftalat (DOP) ENPAK Kimya Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. (İstanbul)'nden, köpük oluşturu kimyasal olarak kullanılan endotermik köpük oluşturu kimyasal sodyum bikarbonat ise özel bir firmadan satın alma yolu ile temin edilmiştir.

PVC köpük malzemelerin üretiminde, rutubetin uzaklaştırılması amacıyla toz halindeki PVC 80 °C sıcaklıktaki etüvde 24 saat kurutulmuştur. 24 saat sonunda PVC etüvden alınarak soğumadan Tablo 1'de verilen karışım oranlarına göre DOP ve sodyum bikarbonat ile 1400W motor gücü ve 5 litre kapasiteli bir karıştırıcı yardımıyla homojen bir karışım haline getirilmiştir. Karışım pres kalıplama yöntemi ile 200 °C sıcaklık, 100 bar basınç ve 20 dk. presleme süresi koşullarında kalıplanarak PVC köpük malzemeler üretilmiştir.

Tablo 1'de verilen her bir örnek grubu için birer adet levha üretilmiştir. Test örneklerinin tüm levhayı temsil etmesi açısından levhanın farklı yerlerine denk gelecek şekilde 10 adet yoğunluk ve 10 adet darbe testi örneği ASTM standardına uygun bir şekilde daire testere yardımı ile elde edilmiştir. Test örnekleri ASTM D618 (2013) (<https://www.astm.org/d0618-13.html>) standardına uygun olarak iklimlendirme kabini içinde koşullandırılmıştır. Üretilen PVC köpüklerin yoğunluk değerleri ASTM D792 (2013) (<https://www.astm.org/d0792-13.html>) standardına göre belirlenmiştir. Örneklerin çentikli darbe direnci testi ASTM D 256 (2010) (<https://www.astm.org/d0256-10.html>) standardına uygun bir şekilde Zwick HIT 5.5P test makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Köpüklerin hücre yapısı ise mikroskop yardımı ile incelenmiştir.

Tablo 1. Üretilen PVC köpüklerin karışım oranları
Table 1. Experimental design of the produced PVC foams

Örnek kodu	PVC	DOP (*)	Köpük oluşturu kimyasal (*)
KA0	100	30	0
KA0,25	100	30	0,25
KA0,5	100	30	0,5
KA0,75	100	30	0,75
KA1	100	30	1

*: Her yüz gram PVC için gram cinsinden konulacak DOP ve/veya köpük oluşturu kimyasal malzeme miktarını gösterir.

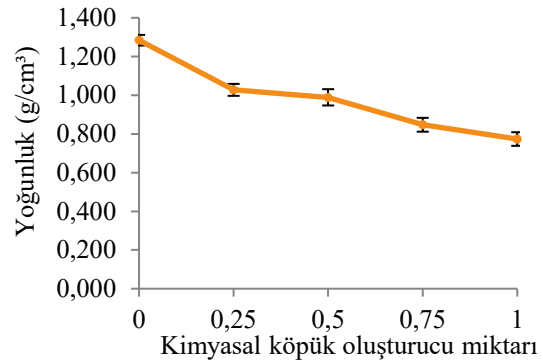
3. Bulgular ve Tartışma

PVC köpüklerin yoğunluk değerleri 0,774-1,284 g/cm³ arasında değişmektedir (Tablo 2). Şekil 1'de gösterildiği gibi köpük oluşturu kimyasal

miktarının artması ile PVC köpüklerin yoğunluk değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Üretim reçetesi içerisindeki köpük oluşturu kimyasal miktarının artması ile köpük malzemelerin yoğunluk değerlerinde yaklaşık %40 azalma sağlanmıştır. En iyi hücre yapısına sahip köpük oluşumunun gerçekleştiği grupta (KA0,25) yoğunluk değerlerinde yaklaşık %20 azalma meydana gelmiştir. Benzer sonuçlar diğer çalışmalarda da rapor edilmiştir (Mengelöglü ve Matuana, 2001; Mengelöglü ve Matuana, 2003; Abu-Zahra ve Alian, 2010; Petchwattana ve Covavisaruch, 2011). Ticari PVC köpük (dekota) yoğunluğu ise 0,500-0,700 g/cm³ arasındadır (URL-1).

Tablo 2. PVC köpüklerin yoğunluk ve darbe direnci değerleri
Table 2. Density and impact strength values of PVC foams

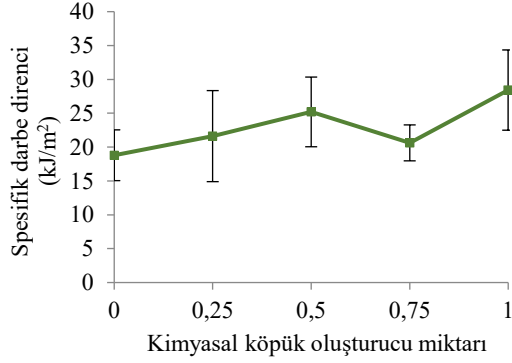
	Yoğunluk (g/cm ³)	Darbe direnci (kJ/m ²)	Spesifik darbe direnci (kJ/m ²)
KA0	1,284±0,03	24,09±4,46	18,79±3,75
KA0,25	1,028±0,03	22,12±6,62	21,62±6,72
KA0,5	0,989±0,04	24,87±4,97	25,20±5,14
KA0,75	0,847±0,04	17,45±2,13	20,63±2,65
KA1	0,774±0,04	21,91±4,33	28,42±5,92



Şekil 1. PVC köpüklerin yoğunluk grafiği
Figure 1. Density graph of PVC foams

Tablo 2'de verilen PVC köpüklerin darbe direnci değerleri 17,45-24,87 kJ/m² arasındadır. Üretilen PVC köpüklerin darbe direnci değerleri bilindiği üzere yoğunlukla ilişkili bulunmuştur. Köpük malzemeler içerisinde oluşturulan köpüklerin darbe direnci üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla malzemelerin spesifik darbe direnci değerleri belirlenmiş Şekil 2'de verilmiştir. PVC köpüklerin spesifik darbe direnci değerleri kimyasal köpük oluşturu miktarının artması ile artış göstermiştir. Köpük malzemelerin yüksek enerji absorblama (enerjiyi

soğurma) özelliğine sahip olduğu bilinmektedir (Matuana ve ark., 1998). Ancak 0,75 kimyasal köpük oluşturuca içeren örneklerin darbe direnci değerlerinde (KA0,75) düşüş meydana gelmiştir. Bu düşüşün hücre birleşmeleri ve düzensiz hücre yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Mevcut endüstriyel PVC köpüğün çentikli darbe direnci değeri 3,1 kJ/m² olarak verilmektedir (URL-1).



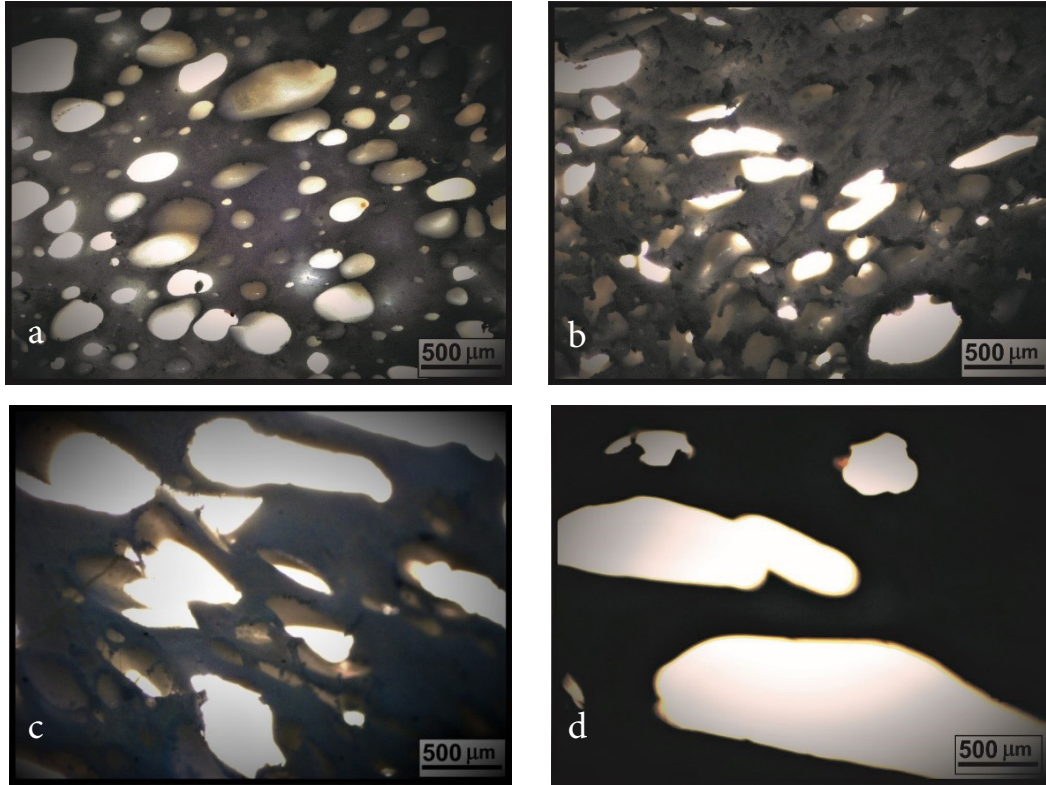
Şekil 2. PVC köpüklerin spesifik darbe direnci grafiği
Figure 2. Specific impact strength graph of PVC foams

PVC köpüklerin mikroskop görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir. Köpüklerin hücre yapısı incelendiğinde tüm PVC köpüklerde hücre boyutu, kapalı hücre

oranı ve hücre dağılımı kimyasal köpük oluşturuca miktarından etkilenmiştir. 0,25 kimyasal köpük oluşturuca içeren köpüklerde (KA0,25) daha küçük, kapalı hücre ve homojen bir hücre yapısı gözlemlenmiştir. Levhanın alt ve üst kısımlarına doğru daha büyük hücreler meydana gelmiştir.

Kimyasal köpük oluşturuca malzeme miktarının artması ile köpük yapısı daha düzensiz hale gelmiş, hücre birleşmeleri ve daha büyük hücreler oluşmuştur.

En büyük hücre boyutu KA1 kodlu köpüklerde meydana gelmiştir. Hücrelerin gaz çıkış yönünde yönlendiği ve neredeyse kapalı hücrelerin hiç olmadığı bir hücre yapısı gözlemlenmiştir. Büyük hücre oluşumunun yüksek kimyasal köpük oluşturuca oranı ile eriyik malzeme içerisinde bozulan gaz miktarının daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bozulan gaz miktarının fazla olması birim hacme (m³) düşen hücre çekirdeklenmelerinin sayısının artması ve dolayısıyla daha geniş ve yakın hücrelerin oluşması demektir. Sonuç olarak hücre büyümeleri ve hücre birleşmeleri artmaktadır (Abu-Zahra ve Alian, 2010; Farsheh ve ark., 2011; Ghasemi ve ark., 2012). Bu sonuçlar malzemede oluşturulan köpüğün boyut, şekil ve dağılımının iyileştirilmesi ile daha iyi sonuçların alınabileceğini göstermektedir.



Şekil 3. PVC köpüklerin mikroskop görüntüleri a) KA0,25, b) KA0,5, c) KA0,75, d) KA1
Figure 3. Microscope images of PVC foams a) KA0,25, b) KA0,5, c) KA0,75, d) KA1

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada atık PVC geri dönüştürülerek polimer köpük malzemeler üretilmiştir. Üretilen PVC köpük malzemelerin yoğunluk, darbe direnci ve hücre yapısı üzerine kimyasal köpük oluşturuç miktarının etkisi incelenmiştir.

PVC köpük malzemelerde kimyasal köpük oluşturuç miktarının artması ile PVC köpüklerin yoğunluk değerlerinde yaklaşık %40'lara kadar bir azalma sağlanmıştır. En iyi hücre yapısına sahip köpüklerin (KA0,25) yoğunluk değerlerinde yaklaşık %20'lik bir azalma meydana gelmiştir.

PVC köpüklerin spesifik darbe direnci değerleri kimyasal köpük oluşturuç miktarı arttıkça artış göstermiştir. Ancak 0,75 kimyasal köpük oluşturuç içeren köpük malzemelerde (KA0,75) bir azalma meydana gelmiştir.

Köpüklerin hücre yapısı incelendiğinde, kimyasal köpük oluşturuç miktarının artması ile hücre birleşmelerinin meydana geldiği ve daha büyük hücrelerin oluştuğu gözlemlenmiştir. En iyi hücre yapısı 0,25 kimyasal köpük oluşturuç içeren köpüklerde (KA0,25) meydana gelmiştir.

Bu çalışmanın sonuçlarından yola çıkılarak ileriki çalışmalarda atık PVC köpük malzemelerin farklı köpük oluşturuç malzemeler ile üretilerek özellikleri incelenebilir. Ayrıca atık PVC'ün farklı kullanım alanlarında değerlendirilmesine yönelik araştırmalar yapılabilir.

Kaynaklar

Abu-Zahra, N. H., Alian, A. M., 2010. Density and cell morphology of rigid foam PVC-clay nanocomposites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 49 (3): 237-243.

ASTM D256, 2010 (<https://www.astm.org/d0256-10.html>). Standard test for determining the Izod pendulum impact resistance of plastics. ASTM International.

ASTM D618, 2013 (<https://www.astm.org/d0618-13.html>). Standard practice for conditioning plastics for testing. ASTM International.

ASTM D792, 2013 (<https://www.astm.org/d0792-13.html>). Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement. ASTM International.

Augier, L., Sperone, G., Vaca-Garcia, C., Borredon, M. E., 2007. Influence of the wood fibre filler on the internal recycling of poly (vinyl chloride)-based composites. *Polymer Degradation and Stability*, 92 (7): 1169-1176.

Demir, H., Sipahioglu, M., Balkose, D., Ulku, S., 2008. Effect of additives on flexible PVC foam formation.

Journal of materials processing technology, 195 (1-3): 144-153.

Eaves, D., 2001. *Polymer Foams: Trends in Use and Technology*. Rapra Technology Limited, pp. 111-113.

Farsheh, A. T., Talaeipour, M., Hemmasi, A. H., Khardemieslam, H., Ghasemi, I., 2011. Investigation on the mechanical and morphological properties of foamed nanocomposites based on wood flour/PVC/multi-walled carbon nanotube. *BioResources*, 6 (1): 841-852.

Fried, J. R., 2014. *Polymer Science and Technology*. Pearson Education, pp. 273-371.

Ghasemi, I., Farsheh, A. T., Masoomi, Z., 2012. Effects of multi-walled carbon nanotube functionalization on the morphological and mechanical properties of nanocomposite foams based on poly (vinyl chloride)/(wood flour)/(multi-walled carbon nanotubes). *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 18 (3): 161-167.

Gohatre, O. K., Biswal, M., Mohanty, S., Nayak, S. K., 2021. An effective sustainable approach towards recycling and value addition of waste poly (vinyl chloride) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) recovered from electronic waste (e-waste). *Journal of Polymer Research*, 28 (9): 1-16.

Matuana, L. M., Park, C. B., Balatinecz, J. J., 1998. Cell morphology and property relationships of microcellular foamed PVC/wood-fiber composites. *Polymer Engineering & Science*, 38 (11): 1862-1872.

Mengeloglu, F., Matuana, L. M., 2001. Foaming of rigid PVC/wood-flour composites through a continuous extrusion process. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 7 (3): 142-148.

Mengeloglu, F., Matuana, L. M., 2003. Mechanical properties of extrusion-foamed rigid PVC/wood-flour composites. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 9 (1): 26-31.

Nawaby, A. V., Zhang, Z., 2004. Solubility and Diffusivity. *Thermoplastic Foam Processing: Principles and Development*, pp. 1-42.

Petchwattana, N., Covavisaruch, S., 2011. Influences of modified chemical blowing agents on foaming of wood plastic composites prepared from poly (vinyl chloride) and rice hull. *In Advanced Materials Research*. 306, 869-873.

Rigamonti, L., Grosso, M., Møller, J., Sanchez, V. M., Magnani, S., Christensen, T. H., 2014. Environmental evaluation of plastic waste management scenarios. *Resources, Conservation and Recycling*, 85: 42-53.

Shakarami, K., Doniavi, A., Azdast, T., Aghdam, K. M., 2013. Microcellular foaming of PVC/NBR thermoplastic elastomer. *Materials and Manufacturing Processes*, 28 (8): 872-878.

Titow, W. V., 2012. *PVC Plastics: Properties, Processing, and Applications*. Springer Science & Business Media,

pp. 10-16.

URL-1: <http://dekota.com.tr/ozellikleri.php> (Ziyaret tarihi: 13.06.2022).

Vachon, C., Gendron, R., 2005. Research on Alternative Blowing Agents. *Thermoplastic Foam Processing: Principles and Development*, 139-191.

Verma, R., Vinoda, K. S., Papireddy, M., Gowda, A. N. S., 2016. Toxic pollutants from plastic waste-a review.

Procedia Environmental Sciences, 35: 701-708.

Zhang, J. P., Zhang, C. C., Zhang, F. S., 2021. A novel process for waste polyvinyl chloride recycling: Plant growth substrate development. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9 (4): 105475.

Zheng, Y., Yanful, E. K., Bassi, A. S., 2005. A review of plastic waste biodegradation. *Critical Reviews in Biotechnology*, 25 (4): 243-250.