ATIK YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN PLASTİKLERDEN FİLAMENT ÜRETİMİ, HİBRİT İPLİK OLUŞTURULMASI VE İPLİKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Hakan GÜRVARDAR

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN PLASTİKLERDEN FİLAMENT ÜRETİMİ, HİBRİT İPLİK OLUŞTURULMASI VE İPLİKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Hakan GÜRVARDAR
0009-0003-1051-3475

Doç. Dr. Fatih SÜVARİ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans

ATIK YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN PLASTİKLERDEN FİLAMENT ÜRETİMİ, HİBRİT İPLİK OLUŞTURULMASI VE İPLİKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Hakan GÜRVARDAR

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fatih SÜVARİ

Plastik ürünler çok fazla miktarlarda kullanılmaktadır. Ancak plastiklerin çok uzun yıllar doğada bozunmaması, bu malzemelerin çevresel kirlilik oluşturmasına sebep olmaktadır. Plastiklerin geri dönüştürülmesi bu kirliliğin azaltılmasında çok önemli bir rol oynamaktadır. Plastik atıkların ilk sırasında yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) yer almaktadır. Bu çalışmada HDPE atıklar çevreden toplanmış ve 2-4 mm boyutlarında granül oluşturacak şekilde kesilmiştir. Ardından yıkama ve kurutma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Granüllerden farklı numaralarda filamentler üretilmiştir. Gerçekleştirilen kopma testleri neticesinde, atık HDPE polimerinden üretilen filamentlerin kopma dayanımı, saf HDPE polimerinden üretilen filamentlere göre düşük çıkmıştır. Atık HDPE polimerinden üretilen filamentlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için, filamentler pamuk ipliği ile bükülerek hibrit iplikler oluşturulmuştur. Hibrit iplik oluşumu, atık HDPE polimerinden üretilmiş filamentlerin, yüksek dayanıma sahip hibrit ipliğin bir bileşeni olmasını sağlamıştır. Genel olarak, bu çalışma, HDPE plastiklerin geri dönüştürülmesinin, plastik atık kirliliğinin azaltılmasına katkıda bulunabilecek yüksek mukavemetli hibrit ipliklerin üretimine yol açabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: HDPE, filament, atık plastik
2023, xii + 51 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

FILAMENT PRODUCTION FROM WASTE HIGH-DENSITY POLYETHYLENE PLASTICS, HYBRID YARN FORMATION AND INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF THE YARNS

Hakan GÜRVARDAR

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Textile Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fatih SÜVARİ

Plastic products are used in large quantities. However, the fact that plastics do not degrade in nature for many years causes environmental pollution of these materials. Recycling of plastics is very important in reducing this pollution. High-density polyethylene (HDPE) is in the first place of plastic waste. In this study, HDPE wastes were collected from the environment and cut to form granules of 2-4 mm in size. Afterwards, washing and drying processes were carried out. Filaments of different yarn counts were produced from the granules. As a result of the tensile tests, the breaking strength of the filaments produced from waste HDPE polymer was lower than the filaments produced from virgin HDPE polymer. In order to improve the mechanical properties of the filaments produced from waste HDPE polymer, hybrid yarns were formed by twisting the filaments with cotton yarn. The hybrid yarn formation made filaments produced from waste HDPE polymer a component of the high strength hybrid yarn. Overall, this study shows that recycling of HDPE plastics can lead to the production of high strength hybrid yarns, which can contribute to reducing plastic waste pollution.

Key words: HDPE, filament, waste plastic
2023, xii + 51 pages.

TEŞEKKÜR

Eğitim sürem boyunca verdikleri tüm desteklerden dolayı Bursa Uludağ Üniversitesi Tekstil Mühendisliği bölümü hocalarıma ve danışman hocam Doç. Dr. Fatih Süvari'ye teşekkürlerimi sunarım.

Hakan GÜRVARDAR
13/06/2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vi
ABSTRACT vii
TEŞEKKÜR viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ x
ŞEKİLLER DİZİNİ xi
ÇİZELGELER DİZİNİ xii
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
2.1. Plastiklerin Geri Dönüşümü 3
2.2. Polietilen Polimerinin Özellikleri 5
2.3. HDPE filament üretimi 6
2.4. Hibrit İplik Üretimi ve Özellikleri 10
3. MATERYAL ve YÖNTEM 14
3.1. Materyal 14
3.2. Üretim Yöntemi 14
3.3. Test Yöntemleri 17
3.3.1. Filament numara ölçümü 17
3.3.2. Kopma yükü ve kopma uzaması ölçümleri 17
3.3.3. Polimer karakterizasyonu 18
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 20
4.1. Ekstrüder Hızının HDPE Filament Numarasına Etkisi 20
4.2. HDPE Filament Üretiminde Çekimin Filament Numarasına Etkisi 23
4.3. Soğutma Şartlarının HDPE Filament Numarasına Etkisi 24
4.4. Filament Numarasının Kopma Yüküne Etkisi 26
4.5. HDPE Filament Üretiminde Çekimin Kopma Yükü ve Mukavemete Etkisi 35
4.6. Soğutma Şartlarının HDPE Filament Kopma Yükü ve Mukavemetine Etkisi 38
4.7. Hibrit İpliklerin Oluşturulması 40
4.8. Hibrit İpliklerin Kopma Yükü ve Kopma Uzaması Sonuçları 42
5. SONUÇ 47
KAYNAKLAR 49
ÖZGEÇMİŞ 51

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
°C	Santigrat
CH_2	Metilen
CH_3	Metil grup
C	Karbon
dak	Dakika
mm	Milimetre
dev	devir
mg	Miligram
cm	Santimetre
kg	Kilogram
R^2	Regresyon katsayısı
g	Gram
s	Saniye
α	Anlamlılık seviyesi
J	Joule
K	Kristalizasyon derecesi
t	Tur

Kısaltmalar	Açıklama
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
PE	Polietilen
PETKİM	Petkim Petrokimya Holding A.Ş.
ISO	Uluslararası Standart Organizasyonu
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
BUTEKOM	Bursa Teknoloji Koordinasyon ve Ar-Ge Merkezi
TS	Türk Standardı
FTIR	Fourier Dönüşümü Infrared Spektroskopisi
ATR	Zayıflatılmış Toplam Yansıtma
MFR	Eriyik Akışkanlığı Hızı
ASTM	Amerikan Malzeme ve Test Derneği
ANOVA	Varyans Analizi
LSD	En Az Anlamlı Fark
LDPE	Alçak Yoğunluklu Polietilen

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Polietilenin kimyasal gösterimi	5
Şekil 2.2.	HDPE filament örnek üretim hattı	7
Şekil 2.3.	HDPE polimerinden üretilmiş farklı renklere sahip iplikler	7
Şekil 2.4.	Meyve ve sebzeleri dış ortamdan koruyan HDPE file yapı	8
Şekil 2.5.	Yüzme havuzlarını dış ortamdan koruyan HDPE kumaş	8
Şekil 2.6.	Ring iplik makinesinde bükümle hibrit iplik oluşumu	13
Şekil 3.1.	Filament üretiminde kullanılan sentetik iplik üretim makinesi	15
Şekil 3.2.	Ekstrüder haznesi içindeki atık HDPE granüller	16
Şekil 3.3.	Uzunluk ölçümlerinin yapıldığı çıkrık cihazı	17
Şekil 3.4.	Shimadzu AG-X plus mukavemet test cihazı	18
Şekil 4.1.	Ekstrüder hızına bağlı saf HDPE filament numarası değişimi	21
Şekil 4.2.	Ekstrüder hızına bağlı atık HDPE filament numarası değişimi	22
Şekil 4.3.	Çekim sonrası filament numarası değişimi	24
Şekil 4.4.	Soğutma şartlarının saf HDPE filament numarasına etkisi	25
Şekil 4.5.	Soğutma şartlarının atık HDPE filament numarasına etkisi	26
Şekil 4.6.	Saf HDPE filamentlerin kopma yükü değerleri	27
Şekil 4.7.	Atık HDPE filamentlerin kopma yükü değerleri	28
Şekil 4.8.	Saf ve atık tüm filamentlerin kopma yükü değerleri	28
Şekil 4.9.	Saf HDPE filament DSC testi sonucu (sıcaklık-ısı akış grafiği)	29
Şekil 4.10.	Atık HDPE filament DSC testi sonucu (sıcaklık-ısı akış grafiği)	30
Şekil 4.11.	Saf HDPE filamenti FTIR testi sonucu	33
Şekil 4.12.	Atık HDPE filamenti FTIR testi sonucu	34
Şekil 4.13.	Çekimin saf HDPE filamentlerin kopma yüküne etkisi	36
Şekil 4.14.	Çekimin atık HDPE filamentlerin kopma yüküne etkisi	36
Şekil 4.15.	Çekimin filament mukavemetine etkisi (saf HDPE)	37
Şekil 4.16.	Çekimin filament mukavemetine etkisi (atık HDPE)	37
Şekil 4.17.	Soğutma şartlarının kopma yüküne etkisi	39
Şekil 4.18.	Soğutma şartlarının mukavemete etkisi (saf HDPE)	39
Şekil 4.19.	Soğutma şartlarının mukavemete etkisi (atık HDPE)	40
Şekil 4.20.	Pamuk ipliği ve atık HDPE filamenti	41
Şekil 4.21.	Büküm cihazı	42
Şekil 4.22	Makine üzerinde oluşan hibrit iplik	42
Şekil 4.23.	Referans iplikler ve hibrit ipliklerin kopma yükü değerleri	44
Şekil 4.24.	Referans iplikler ve hibrit ipliklerin kopma uzama değerleri	45
Şekil 4.25.	Hibrit ipliğin test cihazında kopma sonrası görüntüsü	46

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1. Farklı ekstrüder hızlarındaki filament numaraları (Saf HDPE)..... 20
Çizelge 4.2. Farklı ekstrüder hızlarındaki filament numaraları (Atık HDPE).... 21
Çizelge 4.3. Saf HDPE cips ve atık HDPE granüllerinin MFR değerleri..... 23
Çizelge 4.4. Çekim verilen ve verilmeyen filamentlerin üretim bilgileri 23
Çizelge 4.5. Saf HDPE filament üretiminde soğutma şartları 24
Çizelge 4.6. Filamentlerin DSC testi sonucundaki termal değerleri..... 31
Çizelge 4.7. Ekstrüder hızları ve çekim değerleri..... 35
Çizelge 4.8. HDPE filament üretiminde farklı soğutma şartları 38
Çizelge 4.9. Referans iplikler ve hibrit ipliklerin bileşenleri..... 43

1. GİRİŞ

Uzun yıllardır insanlığın hayatında olan plastikler yaşantımızda birçok kullanım alanı bulmaktadır. Örneğin su şişeleri ve gıda kapları gibi içecek ve yiyeceklerin muhafaza edilmesinde, otomobillerde, elektronik cihazlarda, tıbbi ürünlerde kullanımları söz konusudur. Plastiğin çok yönlü ve dayanıklı doğası, onu birçok endüstride vazgeçilmez bir malzeme haline getirmektedir. Plastik malzemelerin bu yaygın kullanımı gelişmiş ülkelerde kişi başına düşen plastik tüketimini yılda ortalama 100 kilograma kadar çıkarmıştır. Bu durum, aynı zamanda gelişmiş ülkelerde tek bir bireyin çevrede biriken plastik atıklara önemli ölçüde katkıda bulunduğu anlamına gelmektedir. Çevredeki plastik atıkların uygunsuz bir şekilde imha edilmesi, balıklar ve deniz kaplumbağaları da dâhil olmak üzere deniz organizmalarının midelerinde mikro-plastiklerin girmesine sebep olmakta bu da deniz ekosistemlerini olumsuz etkilemektedir. Petrol bazlı, oldukça çeşitli plastiklerin doğada uzun süre yok edilememesi çevre kirliliğinin en önemli nedenlerinden biridir. Örneğin güneydoğu Asya'nın bazı kıyı bölgelerinde plastik atıklar o kadar çok birikmiştir ki, büyük kütlelere sahip yüzen plastik adacıklar dahi oluşmuştur. Bu çöp adaları, deniz yaşamı ve nihayetinde insanlık için de önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Bu plastik parçalardan gelen özellikle mikro-plastikler, besin zincirinde yukarı doğru ilerleyebilir ve yalnızca deniz organizmalarına değil, deniz ürünlerini tüketen insanlara dahi zarar verebilir. Plastik sektörü raporuna göre plastiğin büyük bir kısmı geri dönüştürülmeden doğada atık olarak kalmaktadır. Deniz kirliliğinin yanı sıra plastik atıklar kara kirliliğine de katkıda bulunmaktadır.

Plastik malzemelerin geri dönüşümü belirli aşamaları içeren bir süreçtir. Bu aşamalar geri dönüşüm sürecinde önemli adımlardır ve doğru uygulandığında plastik atıklar tekrar kullanılabilir hale gelir. Plastik atıkların geri dönüştürülebilmesi için öncelikle toplanmalı ve türlerine göre ayrıştırılmalıdır. Ayrıştırıldıktan sonra plastikler temizlenir ve yeni plastik ürünler için ham madde olarak kullanılabilecek küçük granüller halinde işlenir, böylece üretilmesi gereken yeni plastik miktarı azaltılır.

Atık malzeme olarak doğaya bırakılan plastik malzemelerin geri dönüşümü konusunda önemli çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin, plastik şişeleri en temel bileşenlerine ayırıp

polyester iplik üreterek kumaş yapılabilmektedir. Böylece hem plastik atıkların çevreyi kirletmesi azaltılmakta hem de petrol bazlı bir ürün olan yeni polyester üretimine olan ihtiyaç azalmaktadır. Bunun yanında 2018 verilerine göre dünyada polimer türü bakımından en fazla plastik atık yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) polimeridir. HDPE farklı yöntemlerle geri dönüştürülebilir ve yeniden kullanılabilir. Genellikle plastik enjeksiyon veya ekstrüzyon yoluyla atık HDPE'den farklı araçlar ve eşyalar (saklama kapları, sıvı şişeleri, şişe kapakları gibi) üretilmektedir. Bu tez çalışmasında ise atık HDPE polimerinden eritme yoluyla filament üretilmesi ve bundan hibrit iplikler oluşturularak nihai dayanımının arttırılması çalışmaları yapılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Plastiklerin Geri Dönüşümü

Bilinen bir gerçek olarak, plastikler dünya genelinde çeşitli sektörlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Örneğin, ulaştırma, inşaat, sağlık hizmetleri, gıda ürünleri ve paketleme gibi alanlarda sıkça karşımıza çıkarlar. Plastiklerin yaygın olarak tercih edilmesinin sebepleri arasında hafiflikleri, dayanıklılıkları, düşük maliyetleri ve tek kullanımlık olabilmeleri bulunmaktadır, bu da üretimlerinin artmasına katkı sağlamıştır (Kayan & Küçük, 2020). Gelişmiş ülkelerde kişi başına düşen plastik tüketimi yıllık ortalama olarak 100 kilograma kadar yükselmektedir (Gourmelon, 2015).

OECD'nin raporuna göre, küresel olarak plastik üretimi 2000 yılında 234 milyon ton iken, 2019'da bu miktar 460 milyon tona çıkmıştır. Aynı şekilde, 2000 yılında 156 milyon ton olan plastik atık miktarı, 2019'da 353 milyon tona ulaşmıştır. Bu da plastik atıkların iki katından fazla arttığını göstermektedir (Gönültaş, 2022). Ancak, petrol kökenli çeşitli plastik atıkların doğada uzun süreler boyunca yok olmaması, çevre kirliliğinin önemli bir sebebidir (Aslan, 2018; Kayan & Küçük, 2020).

Denizler ve okyanuslarda, plastik atıkların büyük bir kısmı birikmekte ve deniz yaşamı üzerinde ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. 2050 yılına kadar devam ederse, bazı denizlerde balıklardan çok plastik atıkların bulunabileceği öngörülmektedir (Johnston, 2017). Plastik sektörü raporuna göre, plastiklerin çoğu doğada atık olarak kalırken geri dönüşüme gitmemektedir. Atık plastiklerin sadece %9'u geri dönüştürülmüş ve %12'si yakılmıştır (Kayan & Küçük, 2020). Bu durum, plastik atıkların doğal çevreye verdiği zararın boyutunu vurgulamaktadır.

Öte yandan, plastik atıkların yakılması, toksik gazların ortaya çıkmasına ve insanlar ile hayvanlar için zararlı olmasına yol açmaktadır. Bu gazları solumak, solunum yolu rahatsızlıklarına ve hava kirliliğinin artmasına sebep olabilir (Kayan & Küçük, 2020). Plastik atıkların doğada çözünmesi çok uzun yıllar sürdüğünden dolayı, besin zincirindeki canlılar tarafından sindirilemeyerek zarar görmelerine ve çevre kirliliğinin temel

nedenlerinden biri haline gelmelerine neden olur. Bu durum, ekosistemdeki dengesizlikleri artırır (Durak, 2016).

Türkiye, 2021 yılında dünya genelinde en fazla plastik atık üreten dokuzuncu ülke olarak kayıtlara geçmiştir. Bu yaklaşık 5 milyon 600 bin ton plastik atık üretimine denk gelmektedir (Anonim, 2022). Bu durum çevre kirliliği ve sürdürülebilirlik açısından endişe verici bir durum ortaya koymaktadır. Gündelik hayatta sık sık kullandığımız birçok ürün plastik malzemelerden yapılmaktadır, örnek olarak su şişeleri, market poşetleri, şampuan kutuları ve daha birçok örnek gösterilebilir. Plastik malzemelerin geri dönüşümü ise, belirli aşamalar içeren bir süreçtir. Bu aşamalar, plastik atıkların tekrar kullanılabilir hale gelmesini sağlamak için geri dönüşüm sürecinde önemli adımlardır ve doğru bir şekilde uygulandığında büyük bir potansiyele sahiptir.

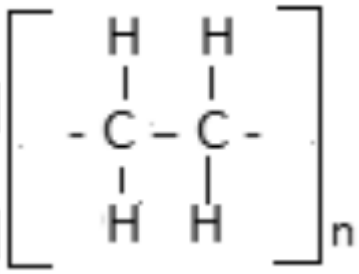
Mekanik geri dönüşüm, fiziksel özelliklerin değiştirilmeden, mekanik işlemlerle malzemenin yeni bir kullanım için hazırlanmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem, plastik atıkların azaltılmasına ve kaynakların daha verimli bir şekilde kullanılmasına yardımcı olur. HDPE, LDPE, PP, PET, PVC, PS gibi polimer türleri geri dönüştürülen plastikler arasında yer alır. Geri dönüşüm süreci, çöpe atılan plastik malzemelerin ayrıştırılması ve geri kazanılmasını içerir. Aynı zamanda geri dönüşüm için ayrılan alanlarda toplanan plastik malzemeler, geri dönüşüm merkezlerine gönderilir. Bu plastik malzemeler sınıflandırılır ve daha sonra işleme kolaylığı sağlamak için küçük parçalara ayrılır. Parçalama işlemi, kırıcılar, öğütücüler, parçalayıcılar ve eziciler aracılığıyla gerçekleştirilir. Parçalanmış plastik malzemeler, sıcak su püskürtülerek yıkama havuzlarında etiketlerden ve kirlerden arındırılır. Bu aşamada, plastik malzemeler, kullanıma hazır hale getirilebileceği gibi, uygun sıcaklıklarda eritilip daha sonra soğutularak cips formuna dönüştürülebilir. Cipsler daha sonra plastik hammaddesi olarak kullanılabilir (Francis, 2017).

Doğaya terk edilen plastik atıkların geri dönüşümü konusunda çalışmalar devam etmektedir (Francis, 2017). Özellikle tekstil endüstrisi, geri kazanım sürecinde çoğunlukla polyester plastik atıkları kullanarak iplik üretimi gerçekleştirmektedir (Telli, Özdil, & Babaarslan, 2012). Atık polyesterin tercih edilme nedeni ise üretilen ipliğin

kumaş üretimi için mekanik açıdan daha uygun olmasıdır. Bu sayede atık malzemeler değerlendirilerek çevre dostu bir yaklaşım benimsenmektedir.

2.2. Polietilen Polimerinin Özellikleri

Çok yönlü ve yaygın olarak kullanılan bir malzeme olan polietilen polimeri, hidrojen yan gruplarının bağlanmış olduğu sağlam bir karbon omurgadan oluşan bir doğrusal zincir yapısı sergiler. Şekil 2.1'de etilen monomerinden oluşan polietilenin kimyasal gösterimi verilmiştir (Kolanjikombil, 2018).



Şekil 2.1. Polietilenin kimyasal gösterimi

Bu benzersiz bileşim, üç farklı ve iyi bilinen polietilen polimer tipinin oluşturulmasına olanak tanır. İlki, nispeten düşük yoğunluğu ve esneklik özelliği olan düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) polimeridir. İşleme kolaylığı gerektiren uygulamalar için uygun bir seçimdir. Öte yandan, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) daha yoğun bir moleküler yapıya sahiptir, bu da ona gelişmiş güç, sertlik ve çeşitli çevresel faktörlere karşı daha yüksek direnç sağlar. Bu özel malzeme, dayanıklılık ve sağlamlık gerektiren uygulamalarda kullanım alanı bulur. Son olarak, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE), tokluk, aşınma direnci ve çok iyi darbe dayanımı sağlayan uzun molekül zincirleri sayesinde yüksek performansın çok önemli olduğu tıbbi implantlar, balistik zırh ve endüstriyel bileşenler gibi zorlu uygulamalarda kullanılmaktadır (Kolanjikombil, 2018).

Polietilen, kalıplanabilen bir malzemedir ve bu özelliği sayesinde ekstrüzyon yöntemiyle şekillendirilebileceği gibi çeşitli kalıplara da dökülebilir. Bu malzeme, düşük su emme, sertlik, dayanıklılık ve boyutsal istikrar gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca, polietilen iyi bir

gaz bariyeri oluşturabilme özelliğine sahiptir ve asit, yağ ve petrol gibi kimyasallara karşı dayanıklıdır (Saydaş Plastik, 2022). Polietilen, birçok farklı alanda kullanılmaktadır, örneğin (Saydaş Plastik, 2022):

- Yalıtım malzemesi olarak,
- Plastik şişe, kap ve kutuların üretiminde,
- Plastik boruların imalatında,
- Ambalaj ve paketleme işlemlerinde,
- Mutfak eşyalarının üretiminde,
- Ayakkabı sanayi ve kaplamaların yapımında

2.3. HDPE filament üretimi

HDPE polimerlerinden filament üretimi için, birden fazla adım içeren eriyikten eğirme yöntemi kullanılır. Başlangıçta, HDPE cipsleri ekstrüder haznesine konur. Bu kısımda fazladan katkı maddelerini taşıyan masterbatch ilave edilebilir. Polimer ekstrüderde katı fazdan sıvı faza eritilir. HDPE polimerinin erime sıcaklığının daha üstünde bir sıcaklık tercih edilmelidir. Literatürde bu sıcaklık 210 °C olarak önerilmiştir (Kolanjikombil, 2018). Erimiş polimer daha sonra küçük delikleri olan bir düze boyunca yönlendirilir. Deliklerin boyutunun elde edilen sürekli filamanın çapı üzerinde etkisi vardır. Ekstrüde edilmiş HDPE, katılaşması ve şeklini koruması için hava veya su sistemiyle hızla soğutulur. Bu, verimli bir hava sistemi veya erimiş polimeri hızla soğutarak kararlı bir filament halinde katılaşmasına izin veren hassas bir su soğutma mekanizması kullanılarak gerçekleştirilebilir. Prosesin kararlılığını korumak için düze çapı, filament çapı oranının 4:1 ve 10:1 aralığında muhafaza edilmesi tavsiye edilmektedir. Bu önerilen aralığa bağlı kalarak, üretim sürecinden en iyi sonuçlar elde edebilir ve sürekli olarak yüksek düzeyde kalite ve performans sağlanabilir (“Monofilament extrusion process,” 2023). Filament daha sonra bir dizi silindir aracılığıyla gerilir ve güçlendirilir. Filament bu germe işleminden geçerken incelir ve istenen filament çapı elde edilir. Son olarak, filamentler, depolama ve nakliye için makaralara veya bobinlere sarılır (Kolanjikombil, 2018; McIntyre, 2005). Şekil 2.2’de HDPE filamentin örnek bir üretim hattı görüntüsü verilmiştir (“Monofilament extrusion process,” 2023).



Şekil 2.2. HDPE filament örnek üretim hattı (“Monofilament extrusion process,” 2023)

HDPE filamentlerin kullanımı, öncelikle, küflenmeye karşı dayanıklılık özelliklerinin dikkate değer bir avantaj sağladığı dış mekânlarda görülür. Bu tür uygulamalara örnek olarak güneş kırıcılar, gölgelik kumaşları, güvenlik fileleri, rüzgâr duvarları, yüzme havuzu örtüleri, balık ağları, misinalar ve iplikler verilebilir (Kolanjikombil, 2018; Ugbolue, 2009). HDPE polimerinden üretilmiş farklı renklere sahip iplikler Şekil 2.3’de verilmiştir (Swicofil, 2023). HDPE filamentin sonradan boyanması çok zordur. Bu sebeple renklendirme işlemi filament üretimi esnasında renkli masterbatch ilavesi ile gerçekleştirilir.



Şekil 2.3. HDPE polimerinden üretilmiş farklı renklere sahip iplikler (Swicofil, 2023)

Şekil 2.4'de meyve ve sebzeleri dış ortamdan ve bazı kuşlardan korumak için HDPE filamentten üretilmiş koruyucu yapılar gösterilmiştir (Swicofil, 2023).



Şekil 2.4. Meyve ve sebzeleri dış ortamdan koruyan HDPE file yapı (Swicofil, 2023)

Şekil 2.5'de yüzme havuzlarını dış ortamdan korumak için HDPE filamentten üretilmiş koruyucu yapılar gösterilmiştir. HDPE yapının UV direnci, yüksek mukavemeti, nemli ve kuru ortam şartlarından etkilenmemesi, güzel görünümü, kolay bakımı, çok hızlı kuruması gibi avantajlarından faydalanılmaktadır (Swicofil, 2023).



Şekil 2.5. Yüzme havuzlarını dış ortamdan koruyan HDPE kumaş (Swicofil, 2023)

HDPE filamentlerinin benzersiz kimyasal direnci, onları filtre kumaşları ve jeotekstiller için uygun bir seçim haline getirmektedir. Bu çok yönlü filamentler, çeşitli kimyasal maddelere dayanma yeteneğine sahip olup, filtrasyon ve toprak stabilizasyonunun çok önemli olduğu zorlu ortamlarda etkili bir şekilde performans göstermelerine olanak tanır (Swicofil, 2023; Ugbolue, 2009).

HDPE filamentler kullanılarak farklı üretim yöntemleriyle yüzeyler üretilebilir. Dokuma teknolojisi ile jeotekstil, filtre, gölgelik, havuz örtüsü gibi kumaşlar üretilebilir. Raşel örme tekniği ile daha çok koruma amaçlı file yapılar (rüzgâr duvarı, koruma fileleri gibi) üretilebilmektedir. Ayrıca kompozit malzeme üretiminde takviye elemanı olarak da HDPE filamentler kullanılabilir. Braiding tekniği ile de çok daha kalın ve sağlam iplikler farklı alanlarda kullanılmak üzere üretilebilir (Swicofil, 2023).

Özetle, eriyikten eğirme işlemi, HDPE cipslerini sağlam ve çok yönlü filamentlere dönüştürür. Bu filamentler, güneşten korunma, güvenlik, su sporları ve filtreleme sistemlerinde kalıcı performans sağlamak için küf direncini ve kimyasal dayanıklılıklarını geliştirerek bir dizi dış mekân uygulamasında kendilerine yer bulurlar.

Atık HDPE plastiklerden filament üretimi ile ilgili literatür araştırıldığında, HDPE polimerinden ziyade, aynı poliolefin grubundan olan polipropilen (PP) plastik atıklardan filament üretimi üzerine bazı çalışmalar tespit edilmiştir (Christiani, Klason, & Shishoo, 1999; Gregor-svetec, Tišler-Korljan, Leskovsek, & Sluga, 2009). Bir çalışmada saf ve geri dönüştürülmüş PP polimer karışımlarından yapılan mono-filamentlerin özellikleri, yalnızca saf polimerden yapılanlarla karşılaştırılmıştır. Saf polimere geri dönüştürülen polimerin ilave edilmesi, kristalizasyonu ve ortalama moleküler oryantasyonu düşürdüğü bulunmuştur. Sonuç olarak da geri dönüştürülmüş polimer kullanılması mukavemeti düşürmüştür. Bununla birlikte, geri dönüştürülmüş polimer kullanmak, üretim maliyetlerini düşürdüğü ve enerji tüketimini ve sera gazı emisyonlarını azalttığı için çevresel ve ekonomik açıdan daha faydalı olduğu belirtilmiştir (Gregor-svetec et al., 2009). Başka bir çalışmada da PP liflerinin reolojik analizleri ile tekrar kullanımlarında üretilebilme durumlarının tahmin edilebileceği gösterilmiştir. PP liflerinin özeliklerinde çok kayıp olmadan geri dönüştürülerek beş kereye kadar üretilebileceği belirtilmiştir. Ancak tekrarlı kullanımlarda molekül ağırlığı, viskozite, eriyik direnci gibi faktörlerde değişimler tespit edilmiştir (Christiani et al., 1999). Daha önce kullanılmış atık polimerin geçirdiği ısıl işlem, çeşitli çevresel koşullara uzun süre maruz kalma (Francis, 2017) ve rastgele toplanan plastiğin doğasında bulunan uygun olmayan içyapı dâhil olmak üzere çok sayıda faktör polimer malzemenin filament oluşumuna etki edebilir. Bu nedenle, atık HDPE polimeri kullanılarak filament üretimi düşünülürken, söz konusu faktörler göz

önüne alındığında, mukavemette PP çalışmalarındaki benzer bir düşüşün beklenebileceğini kabul etmek önemlidir.

2.4. Hibrit İplik Üretimi ve Özellikleri

Teknik tekstilin gelişimi, özel iplikler, teknik iplikler, hibrit iplikler vb. gibi yüksek performanslı iplikler üretmek için yeni süreçlere ve modifikasyonlara olan talebi artırmıştır (Mankodi, 2011). Bu özel ipliklerden hibrit iplikler, iki veya daha fazla farklı tipte elyaf veya ipliğin tek bir iplik formuna getirilmesiyle oluşturulur. Çok farklı tipte malzemelerin bir araya getirilerek hibrit iplik oluşturulması mümkündür. Hibrit iplik üretimindeki en önemli amaçlardan biri bileşenlerin iyi özelliklerinin bir araya getirilmesi arzusudur (Mankodi, 2011). Örneğin doğal ipliklerin hacimliliği ve rahatlığını, sentetik ipliklerin de yüksek mukavemetini hibrit iplik üreterek birleştirme fırsatı doğar. Hibrit ipliklerden üretilen kumaşlar da bu iyi özellikleri bünyesinde barındırır. Hibrit iplikler ayrıca kumaş tasarımı açısından bakıldığında tasarımcıya gelişmiş özellikte ve görüntüde ipliklerle çalışabilme olanağı tanır (Özdemir & Aydın, 2002). Hibrit ipliklerden üretilen kumaşlar hazır giyim sektörü için kullanılabileceği gibi, teknik tekstiller ve kompozit malzeme üretiminde ara yüz elemanı olarak kullanılabilirler (Mankodi, 2011). Hibrit ipliklerin, kompozit malzemelerde metallerin yerine kullanımı giderek daha fazla kabul görmektedir. Malzemeye ısı uygulandığında, hibrit ipliğin termoplastik bileşen erir ve malzeme sağlam bir kompozite dönüştürülür (Alagirusamy, Fangueiro, Ogale, & Padaki, 2006). Bu prensip, birçok uygulama için üstün mekanik özelliklere sahip hafif malzemeler üretir. Bu hafif kompozitler havacılık, otomotiv ve denizcilik sektörlerinin yanı sıra spor malzemeleri ve elektronik endüstrilerinde kullanım alanı bulmaktadır (Alagirusamy et al., 2006). Hibrit iplikler kullanılarak yeni kompozit ürünlerin geliştirilmesi konusunda birçok çalışma yapılmaktadır (Mankodi, 2011).

Hibrit ipliklerin oluşturulmasında en önemli amaçlardan biri de arttırılmış mukavemetin elde edilmesidir. Çünkü hibrit ipliklerden genellikle tek tek bileşenlerine göre daha yüksek mukavemet elde edilir. Yüksek mukavemete sahip hibrit ipliklerden kumaş üretildiğinde ise sadece iyi mukavemet değil, aşınmaya ve yırtılmaya karşı dayanım özellikleri de artabilir (Alagirusamy & Das, 2010).

Hibrit iplikler, tek lifli ipliklerden yapılan kumaşlara kıyasla daha fazla konfor sağlayabilir. Örneğin, pamuk ipliği içeren bir hibrit iplik yumuşaklık, nefes alabilirlik ve emicilik sunabilirken, sentetik lifler hızlı kuruma özellikler sunarak kullanıcıyı rahat hissettirir.

Denim kumaş üretiminde elastan lifi içeren hibrit iplik kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Atkı ve çözgüde öz-iplik olarak elastan kullanılarak istenilen elastikiyet seviyelerine ulaşılmaktadır (Üstündağ, 2014). Elastan bileşenli hibrit iplikler içeren denim kumaşlar torbalanmaya direnç ve yüksek elastikiyet gibi özelliklere sahiptirler (Çataloğlu, 2007). Örneğin, elastan lifi içeren hibrit iplikten yapılan kot pantolonlar, rahat bir uyum sağlarken birçok kez giyilip yıkandıktan sonra bile şeklini koruyabilir. Bu, onları hem stile hem de rahatlığa değer veren tüketiciler arasında popüler bir seçim haline getirebilir.

Hibrit iplik üretimi ile pahalı bir ipliğin maliyetini iplik ve kumaş özelliklerinden çok fazla ödün vermeden düşürmek de mümkündür. Örneğin karbon, aramid gibi nispeten pahalı malzemeler yüksek modüllü polipropilen ile beraber kullanılarak performans kaybı olamadan maliyetlerin düşürülmesi mümkün olabilmektedir (Morin, Adams, Follo, & Salem, 2009).

Hibrit iplikler, modifiye edilmiş konvansiyonel iplik oluşturma teknikleri veya yeni geliştirilen yöntemler kullanılarak üretilebilir. Cam, karbon, kevlar, bazalt, iletken malzemeler, elastomerik malzemeler ve doğal veya sentetik malzemeler gibi yüksek performanslı malzemeler hibrit iplik oluşumunda istenen nihai özelliğe göre kullanılabilir (Mankodi, 2011).

Hibrit ipliklerin üretimi için çeşitli yöntemler ve prosesler geliştirilmiştir. Bu teknikler, istenen özelliklere sahip tek bir iplik oluşturmak için farklı liflerin veya ipliklerin birleştirilmesini içerir. Hibrit iplik üretimi için geliştirilen yöntemler ve süreçler için dört temel gruptan bahsedilebilir. Bunlar, core-spun üretim tekniği, kaplama yöntemi ile üretim, havalı sistem tekniği ve büküm yöntemidir (Üstündağ, 2014).

Core-spun yöntemi, lifler veya filamentten oluşan iplik merkezinin başka lifler veya filamentlerle sarıldığı veya eğrildiği bir iplik üretim yöntemidir. Öz ya da merkez bileşen, ipliğin istenen özelliklerine bağlı olarak farklı bir malzemeden veya sarım lifleriyle aynı malzemeden yapılabilir. Bu yöntemde, merkezde pozisyonlanmış lifler veya filament ipliğe mukavemet ya da esneklik sağlarken, sarım yapılan lifler veya filamentler hacim, yumuşaklık gibi istenen özellikleri ekler. Core-spun iplik üretimi için ring eğirme, open-end rotor eğirme, vortex ve friksiyon eğirme yöntemleri kullanılabilmektedir (Mankodi, 2011; Üstündağ, 2014). Bu üretim yöntemleriyle üretilen core-spun iplikler tekstil endüstrisinde giyim, ev tekstili ve endüstriyel kumaşlar dâhil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Mankodi, 2011).

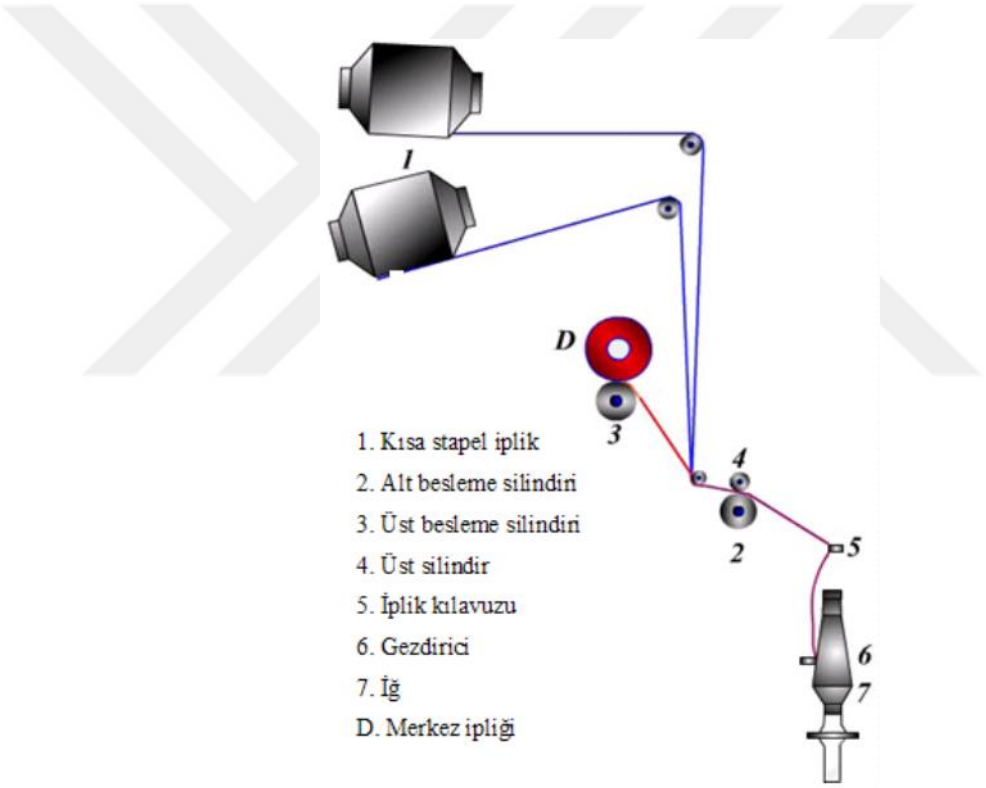
Hibrit ipliklerin oluşumunda tercih edilen bir başka yöntem ise kaplama yöntemidir. Bu yöntemde prensip, merkezde bulunan iplik üzerine içi oyuk iğ üzerinde bulunan ipliğin sarılmasıdır. Merkezdeki iplik, içi oyuk iğ içinden geçmektedir. Bu teknik, merkezdeki bileşenin ipliğin teknik özelliklerini belirlediği ve çekirdeği kaplayan bileşeninin ipliğe estetik değerini verdiği iplikleri üretmek için kullanılır. Bu tip iplikler de giyim, ev tekstilinde kullanılabilir. Bunun yanında cam, karbon, metal gibi materyaller hibrit iplik oluşturtulmasında kullanılıp, bu ipliklerden üretilen kumaşlardan koruma, kalkanlama gibi teknik uygulamalarda faydalanılabilir. Ayrıca dokuma ya da örme teknolojisiyle kumaş üretiminde direk cam ya da karbon ipliği kullanımına nazaran bu iplikleri içeren hibrit iplik kullanımı üretim performansını arttırmaktadır (Mankodi, 2011).

Hibrit iplik oluşumunda özellikle elastanlı ipliklerin üretiminde, havalı sistem ile hibrit iplik üretim yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemdeki prensip, yüksek basınçlı havanın etkisiyle elastan iplikle multifilament yada kesikli yapıdaki ipliği oluşturan filament yada liflerin temas noktalarını arttırarak stabil bir hibrit iplik oluşumuna dayanır. Dokuma işleminde daha çok atkı ipliği olarak kullanılır (Üstündağ, 2014).

Büküm metodu ile hibrit iplik üretiminde küçük bir modifikasyonla ring makinesi kullanılabilir (Alagirusamy et al., 2006). Burada farklı tipte iplik bileşenleri ring iplik sistemine beslenir. İplik bileşenlerinin kopça-bilezik sisteminde dönüşü ile büküm verilip hibrit iplik oluşturulur. Şekil 2.6'da ring iplik makinesinde bükümle hibrit iplik oluşumu

şematik olarak gösterilmiştir (Üstündağ, 2014). Ring iplik sistemi dışında two-for-one ve hamel büküm yöntemleriyle de hibrit iplikler oluşturulabilir.

Hibrit iplikler gelecekteki kullanımları açısından değerlendirildiklerinde umut verici oldukları söylenebilir. Ürünlerdeki ve süreçlerdeki gelişmeler çok hızlı bir şekilde ilerlemektedir ve halen pek çok alanda kullanımı için çalışmalar yapılabilir. Potansiyel gelişme alanlarından bazıları, hibrit ipliklerde nanoteknoloji, akıllı malzemeler ve biyolojik olarak parçalanabilir malzemelerin kullanımıdır. Genel olarak, yeni teknolojiler ortaya çıkmaya ve bu yenilikçi materyallerin olanaklarını genişletmeye devam ettikçe hibrit ipliklerin kullanımın artacağı değerlendirilmektedir (Mankodi, 2011).



Şekil 2.6. Ring iplik makinesinde bükümle hibrit iplik oluşumu (Üstündağ, 2014)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Saf HDPE polimeri olarak PETKİM'in S0464 Yüksek Yoğunluklu Polietilen cipsleri çalışmada kullanılmıştır. Polimerin, firma kataloğuna göre, yiyecek kapları, orta boy su ve yağ bidonları, orta boy kaplar, mutfak eşyaları, mono-filament gibi üretimlere uygun olduğu belirtilmektedir.

Şişe kapakları genellikle, dayanıklılığı ve farklı alanlarda kullanılabilirliği ile bilinen HDPE polimer kullanılarak üretilir. Şişe kapakları üzerine basılan "2" kodlama numarası, malzemenin HDPE olduğunun açık bir tanımlayıcısı olarak işlev görür. Ne yazık ki, birçok su şişesi kapağı çevresel atık olarak atılmakta ve kirliliğe sebep olmaktadır. Bununla birlikte, bu çalışmada, terk edilmiş kapakları toplayarak ve bunları filament üretimi için yeniden kullanarak bu sorunu ele almak için sürdürülebilir bir girişim başlatılmıştır. Çevreden plastik atık toplama işleminin ardından "2" kodlu şişe kapakları filament üretimi için özel olarak seçilmiştir. Bu dikkatli seçim süreci, ortaya çıkan filamentlerin HDPE polimerinden üretilmesini sağlayacaktır.

Çevreden toplanan atık plastikler, ilk olarak 2-4 mm boyutlarında küçük granüllere kesilmiştir. Plastik atıkların küçük granüllere kesilmesi, daha sonraki aşamalarda daha kolay işlenmelerini sağlar. Ardından, yıkama işlemi gerçekleştirilmiş ve atık malzeme üzerindeki olası kirlilikler temizlenmiştir. Yıkama işlemi, atık malzemede biriken kir, toz veya diğer yabancı unsurları gidererek kaliteli bir malzeme elde etmeyi amaçlar. Atık plastik granülleri kurutma işlemine tabi tutulmuştur ve malzemedeki su buharlaştırılmıştır. Böylelikle, malzeme filament üretimi için hazır hale getirilmiştir.

3.2. Üretim Yöntemi

Filament üretimi için Aysa Makina firması tarafından üretilmiş laboratuvar tipi sentetik iplik üretim makinesi kullanılmıştır (Şekil 3.1). HDPE filament üretimi için, atık plastikten hazırlanan granüler malzeme ekstrüder haznesine yerleştirilmiştir (Şekil 3.2). Bu aşamadan sonra, sentetik iplik üretim makinesi ısınması için çalıştırılmıştır.



Şekil 3.1. Filament üretiminde kullanılan sentetik iplik üretim makinesi

Ekstrüder, yüksek ısı ve basınç kullanarak granülleri eritir ve homojen bir karışım elde edilir. Sentetik iplik üretim makinesi, ekstrüderden düzeye kadar beş adet ısıtma bölgesine sahiptir. Bu bölgeler istenilen sıcaklıklara ayrı ayrı ısıtılabilir. Isıtma bölgeleri, filament üretim sürecinde kritik bir rol oynar. Her bölgenin ayrı ayrı kontrol edilebilmesi, malzemenin doğru sıcaklığa ulaşmasını ve istenen özelliklere sahip filamentin üretilmesini sağlar. Ekstrüzyon sıcaklığının belirlenmesi, kalite, mukavemet ve işlenebilirlik gibi faktörleri etkileyen önemli bir karardır. Bu çalışmada, önemli bir üretim parametresi olan ekstrüzyon sıcaklığı, her ısıtma bölgesi için 210 °C olarak seçilmiştir. Literatürdeki bilgilere göre, bu sıcaklık değeri HDPE filament üretimi için kullanılabilmektedir (Kolanjikombil, 2018).



Şekil 3.2. Ekstrüder haznesi içindeki atık HDPE granüller

Düzenin hemen çıkışında yer alan hava üfleme sistemi, polimer eriyiğin daha hızlı katılaşmasını sağlamış ve filament oluşumuna yardımcı olmuştur. Hava üfleme sistemi, ortam sıcaklığındaki havayı üflemektedir. Üretilen filament, işlem sonunda bir bobine sarılmıştır. Bu, filamentin düzgün bir şekilde toplanmasını ve kolay kullanımına olanak tanır. Bobinleme işlemi, filamentin düzenli bir şekilde depolanmasını ve gelecekteki kullanımlar için uygun bir şekilde saklanmasını sağlar.

Saf HDPE polimer kullanılarak filament üretiminde ekstrüder motor hızları 1 dev/dak ile 3 dev/dak arasında değiştirilerek farklı hızlarda üretimler gerçekleştirilmiştir. 1,5 ve 2 dev/dak ekstrüder hızlarında gerçekleştirilen üretimlerde ayrıca çekim verilerek de filamentler üretilmiştir. 1,5 dev/dak hızında üretilen filamentlere ortam sıcaklığında (24 ± 2 °C) hava üfleme, sıcak sudan (70-80 °C) geçirme ve soğuk sudan (17-19 °C) geçirme uygulamaları yapılarak, soğutma şartlarının etkisi incelenmiştir.

Atık HDPE polimeri ile gerçekleştirilen filament üretimlerinde ise 2 dev/dak, 2,5 dev/dak ve 3 dev/dak ekstrüder hızları kullanılmıştır. Saf HDPE polimer üretimindeki gibi 3 farklı soğutma şartı altında, ekstrüder hızı 2,5 dev/dak seçilerek filamentler üretilmiştir.

3.3. Test Yöntemleri

3.3.1. Filament numara ölçümü

Filament numaralarının belirlenmesi sürecinde, filament uzunluğu ve ağırlığının hassas ölçümleri çok önemli bir rol oynar. Filament uzunluğu ölçümü, hassas ölçümler elde etmek için güvenilir ve tutarlı bir yöntem sağlayan bir çıkrık cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3). Filament ağırlığının ölçümü, iplik numaralarının belirlenmesinde eşit derecede önemlidir. Doğru ölçümler elde etmek için hassas tartı aletlerinin veya terazilerin kullanılmasını gereklidir. Filament ağırlık ölçümleri için virgülden sonra üç haneye sahip METTLER PJ300 hassas terazi kullanılmıştır. 1000 metrenin gram ağırlığını ifade eden “tex” numaralandırma sistemi kullanılarak filament numaraları hesaplanmıştır.



Şekil 3.3. Uzunluk ölçümlerinin yapıldığı çıkrık cihazı

3.3.2. Kopma yükü ve kopma uzaması ölçümleri

Filamentlerin kopma mukavemeti testleri, ISO 2062:2009 standart test yöntemi izlenerek Shimadzu AG-X plus mukavemet test makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ancak numune boyutları, filamentlerin yüksek uzama özelliklerine uyum sağlamak için 100 mm'ye ayarlanmıştır. İlgili standarda göre test hızı 250 mm/dak olarak seçilmiştir.

Shimadzu AG-X plus test cihazı, çeşitli malzemeler üzerinde mekanik testler yapmak için endüstride güvenilir ve yaygın olarak kullanılan bir cihazdır. Test yapılan cihaz Şekil 3.4'de gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Shimadzu AG-X plus mukavemet test cihazı

3.3.3. Polimer karakterizasyonu

Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) testleri 10 °C/dak ısıtma hızı ile 200 °C sıcaklığa kadar ısıtma yapılarak Bursa Teknoloji Koordinasyon ve Ar-Ge Merkezi (BUTEKOM) test merkezinde TS EN ISO 11357-3:2018 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Testte azot gazı kullanılmıştır. Test gerçekleştirilen saf HDPE filament ağırlığı 3,96 mg, atık HDPE filament ağırlığı ise 3,27 mg ölçülmüştür.

Filamentlerin moleküler yapısı ve kimyasal bağları ile ilgili daha fazla bilgi edinebilmek için hem saf hem de atık HDPE filamentler üzerinde Fourier Dönüşümü Infrared Spektroskopisi (FTIR) analizi gerçekleştirilmiştir. Ölçümler BUTEKOM test merkezinde ATR yöntemine göre alınmıştır. ATR-FTIR yönteminde, özel numune hazırlığı

gerekmediği için kullanımı daha kolay bir spektroskopi yöntemidir. Ölçüm yapılan dalga sayısı aralığı 450-4000 cm^{-1} dir.

Eriyik akışkanlığı hızı (MFR) testi ASTM D1238:20 standardına göre BUTEKOM test merkezinde yapılmıştır. 300 saniye ön ısıtmada, 190 °C test sıcaklığında, 2,16 kg test kütlesi şartlarında ölçüm gerçekleştirilmiştir. MFR testi hem saf HDPE polimer cipslerine, hem de atık HDPE granüllere yapılmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Ekstrüder Hızının HDPE Filament Numarasına Etkisi

Saf HDPE polimerinden farklı ekstrüder hızlarında filament üretimleri gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.1'de belirtildiği üzere altı farklı ekstrüder hızında saf HDPE polimerinden filamentler üretilmiş ve numaraları ölçülmüştür. Buradaki amaç ekstrüder hızı ile üretilen filament numarası arasındaki ilişkinin tespit edilmesidir. Çizelge 4.1 incelendiğinde, ekstrüder motor hızı arttırıldığına filament numarasındaki artış dikkat çekmektedir.

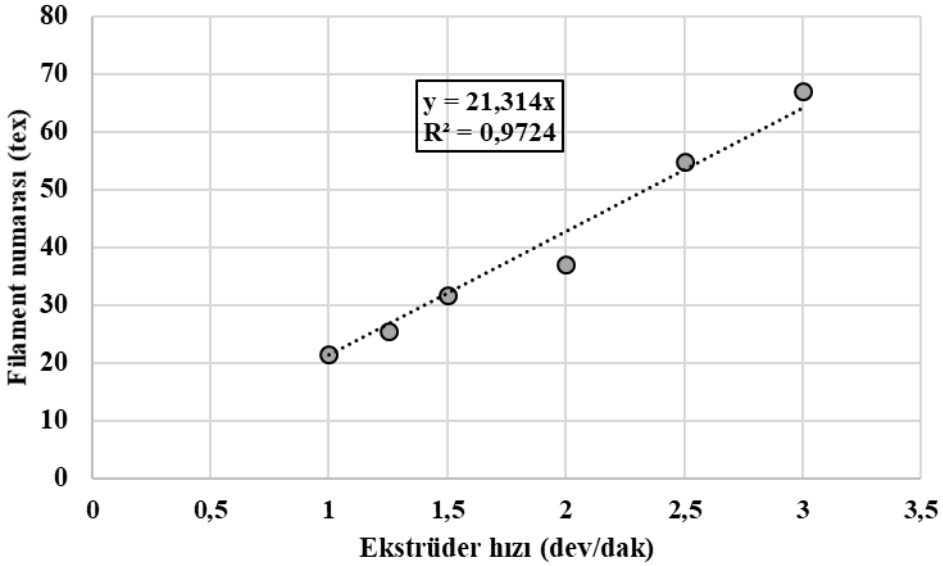
Çizelge 4.1. Farklı ekstrüder hızlarındaki filament numaraları (Saf HDPE)

Ekstrüder motor hızı (dev/dak)	Ölçülen filament numarası (tex)
1	21,5
1,25	25,4
1,5	31,6
2	37,1
2,5	54,7
3	67,0

Filament numarasındaki artışın nasıl değiştiği ile ilgili Şekil 4.1 daha net bilgiler vermektedir. Şekil 4.1 incelendiğinde ekstrüder hızı artışı ile filament numarasının doğrusala yakın bir artış sergilediği görülmektedir. Yapılan regresyon analizi neticesinde R^2 (regresyon katsayısı) değeri 0,9724 hesaplanmıştır. Bu yüksek regresyon katsayısı değeri ekstrüder hızı ile filament numarasının doğrusal bir ilişki içerisinde olduğunu işaret etmektedir. Yapılan iplik numarası ölçümlerini en iyi temsil eden lineer denklem $y=21{,}314x$ denklemidir (0,0 noktası da denklemin elde edilmesine kullanılmıştır). Bu denklemde x ekstrüder hızını y ise filament numarasını temsil etmektedir. Bu denklem kullanılarak istenen filament numarasına göre hangi ekstrüder hızında makinenin çalıştırılması gerektiği hesaplanabilir. Örneğin 47 tex numarasında filament üretmek için yaklaşık 2,2 devir/dak hızında ekstrüder çalıştırılabilir.

Ekstrüder hızı artışı ile filament numarasının artışı fiziki olarak beklenen bir ilişkidir. Çünkü ekstrüder hızı artışı ile düzeye beslenen eriyik polimer miktarı kütlece

artacağından, düzeden çekilen filament birim uzunluğunun ağırlığının (filament numarası) da artış göstermesi beklenen bir durumdur. Bu artış, yapılan bu inceleme sonucunda doğrusal çıkmıştır.



Şekil 4.1. Ekstrüder hızına bağlı saf HDPE filament numarası değişimi

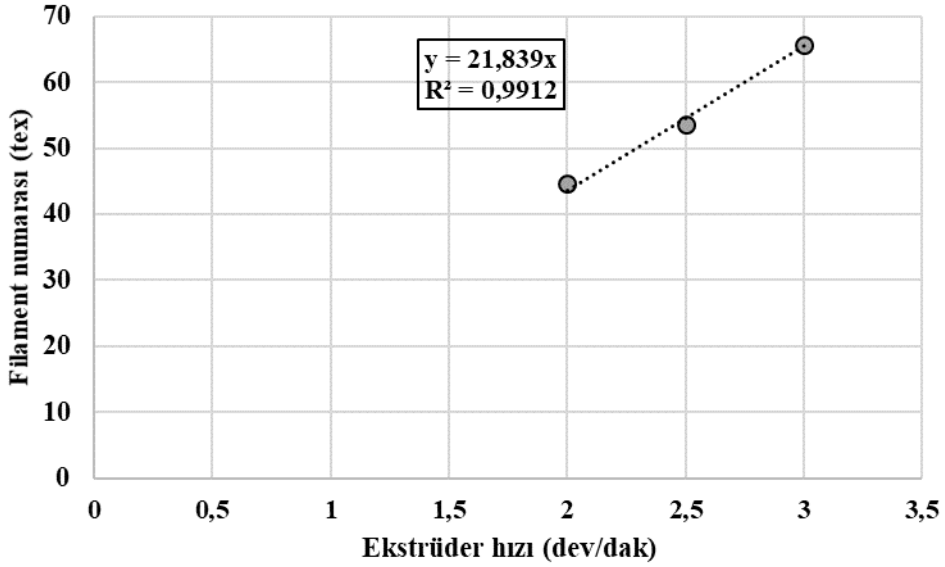
Atık HDPE polimeri kullanılarak 3 farklı ekstrüder hızında filament üretimleri gerçekleştirilmiştir. Saf HDPE kullanılarak yapılan filament üretiminde olduğu gibi atık HDPE kullanılarak yapılan üretimde de beklenti ekstrüder hızı artışı ile filament numarasında artış tespit edilmesidir. Çizelge 4.2 incelendiğinde ekstrüder motor hızı arttırıldığına filament numarasında artış görülmektedir.

Çizelge 4.2. Farklı ekstrüder hızlarındaki filament numaraları (Atık HDPE)

Ekstrüder motor hızı (dev/dak)	Ölçülen filament numarası (tex)
2	44,7
2,5	53,6
3	65,7

Şekil 4.2 incelendiğinde ekstrüder hızı artışı ile atık HDPE polimerinden üretilen filament numarasının doğrusala yakın bir artış sergilediği görülmektedir. Yapılan regresyon analizi neticesinde R^2 değeri 0,9912 hesaplanmıştır. Bu yüksek regresyon katsayısı değeri

ekstrüder hızı ile filament numarasının doğrusal bir ilişki içerisinde olduğunu işaret etmektedir. Yapılan iplik numarası ölçümlerini en iyi temsil eden lineer denklem y=21,839*x* denklemidir (0,0 noktası da denklemin elde edilmesine kullanılmıştır). Bu denklemde *x* ekstrüder hızını y ise filament numarasını temsil etmektedir. Bu denklem kullanılarak istenen filament numarasına göre hangi ekstrüder hızında makinenin çalıştırılması gerektiği hesaplanabilir.



Şekil 4.2. Ekstrüder hızına bağlı atık HDPE filament numarası değişimi

Saf HDPE ve atık HDPE polimerleri ile yapılan filament üretimleri neticesinde, her iki durumda da ekstrüder hızı artışı ile filament numarası değişimi doğrusal artış göstermiştir. Bu doğrusal ilişkileri temsil eden lineer denklemlerin eğim değerlerinin farklı olduğu görülmektedir. Saf HDPE polimerinden yapılan üretimi temsil eden denklemin eğim değeri 21,314 iken, atık HDPE polimerinden yapılan üretimi temsil eden denklemin eğim değeri 21,839'dur. Bu durum aynı ekstrüder hızında atık HDPE ile daha yüksek numarada yani daha kalın filament üretildiğini göstermektedir. Bu durum atık HDPE polimerinin daha akışkan olabileceğine işaret edebilir. Nitekim saf ve atık polimerlere yapılan eriyik akış hızı (Melt Flow Rate) (MFR) testlerinde, atık polimerin eriyik akış hızı daha yüksek çıkmıştır. MFR değerinin yüksek çıkması atık polimerin eridiğinde daha akışkan olduğunu ve viskozitesinin düşük olduğu anlamına gelmektedir. MFR test şartları ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Saf HDPE cips ve atık HDPE granüllerinin MFR değerleri

Numune Kodu	Atık Plastik	Saf Plastik
Ön Isıtma Süresi (s)	300	300
Test Sıcaklığı (°C)	190	190
Test Kütlesi (kg)	2,16	2,16
Eriyik Akışkanlığı Hızı (g/10dk)	6,33	0,333
Standart Sapma	0,162	0,011

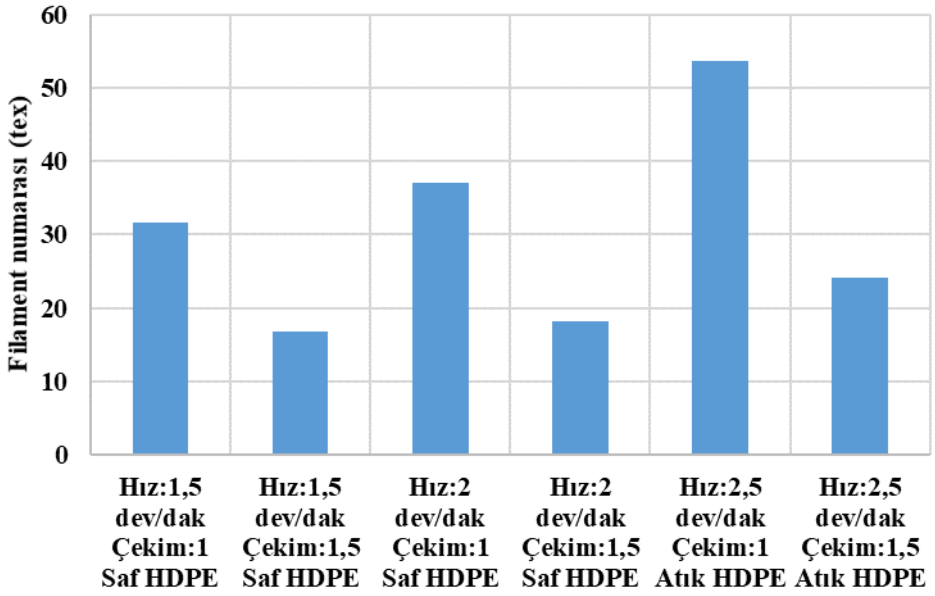
4.2. HDPE Filament Üretiminde Çekimin Filament Numarasına Etkisi

Çalışmanın bu kısmında, HDPE filament üretiminde çekim işleminin filament numarasına etkisi incelenmiştir. HDPE filament üretiminde çekim verebilmek için sarıcı silindirin hızı arttırılarak godet ile sarıcı silindir arasında bir çekim oluşturulmuştur. Çizelge 4.4'te HDPE polimerinden üretilen, çekim verilen ve verilmeyen filamentlerin üretim bilgileri verilmiştir. Sarım silindiri hızının godet silindiri hızına oranı filamente verilen çekim değeridir.

Çizelge 4.4. Çekim verilen ve verilmeyen filamentlerin üretim bilgileri

Kullanılan polimer	Ekstrüder motor hızı (dev/dak)	Çekim değeri
Saf HDPE	1,5	1,0
Saf HDPE	1,5	1,5
Saf HDPE	2	1,0
Saf HDPE	2	1,5
Atık HDPE	2,5	1,0
Atık HDPE	2,5	1,5

Şekil 4.3'te görüldüğü gibi, çekim işlemi ile hem atık hem de saf HDPE polimerinden üretilen filamentlerin numaralarında ciddi bir düşüş görülmüştür. Çekimle filamentler daha ince hale gelmiştir. Daha yüksek hızda filamentin çekilmesi, filament çapında azalmaya sebep olması fiziki olarak da beklenen bir durumdur.



Şekil 4.3. Çekim sonrası filament numarası değişimi

4.3. Soğutma Şartlarının HDPE Filament Numarasına Etkisi

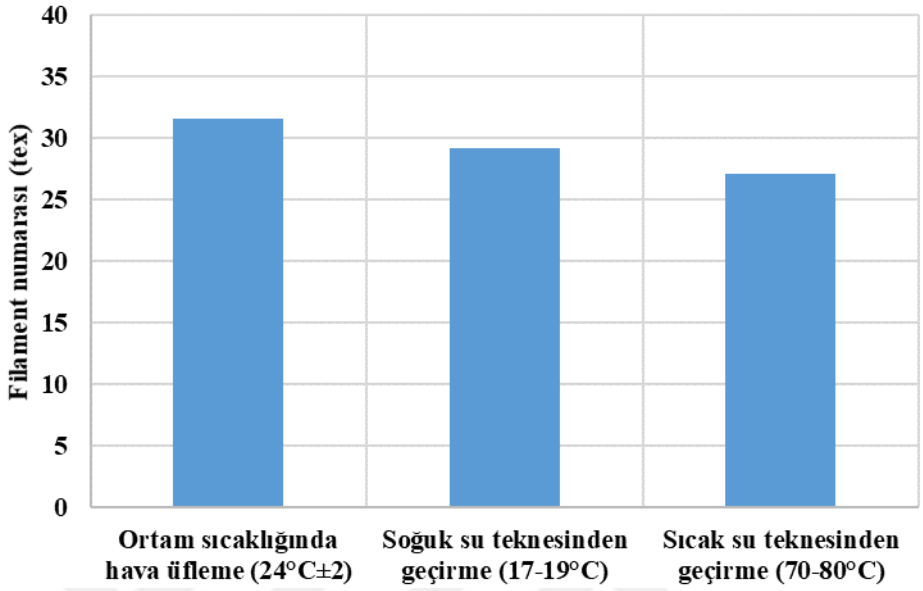
HDPE filamentlerin üretiminde üç farklı soğutma şartı denenerek, farklı soğutma şartlarının filament numarasına etkisi incelenmiştir. Saf HDPE için 1,5 dev/dak üretim hızında, ortam sıcaklığında (24 ± 2 °C) hava üfleme, sıcak sudan (70-80 °C) geçirme ve soğuk sudan (17-19 °C) geçirme şartları altında, düzeden çıkan eriyik polimer soğutulmuştur. Çizelge 4.5'te soğutma şartları verilmiştir.

Çizelge 4.5. Saf HDPE filament üretiminde soğutma şartları

Filament soğutma yöntemi:	Soğutma derecesi:
Ortam sıcaklığında hava üfleme	24 ± 2 °C
Sıcak su teknesinden geçirme	70-80 °C
Soğuk su teknesinden geçirme	17-19 °C

Şekil 4.4'te soğutma şartlarının saf HDPE filament numarasına etkisi verilmiştir. Filament numaralarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Sadece filamenti sudan geçirmenin az da olsa filamenti incelttiği görülmektedir. Burada suyun içerisinde ilerleyen filamentlerin sürtünme etkisine maruz kalması neticesinde daha inceldiği

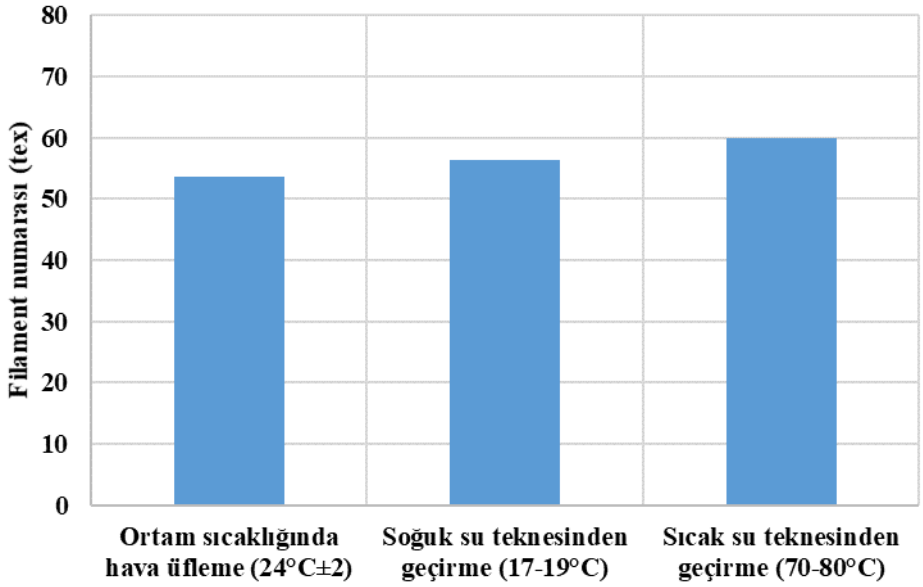
ihtimaller arasındadır. Sıcak sudan geçirilen filamentin ısının ve suyun etkisiyle biraz daha inceldiği görülmektedir.



Şekil 4.4. Soğutma şartlarının saf HDPE filament numarasına etkisi

Benzer şekilde atık plastikten üretilmiş HDPE filamentlerin üretiminde üç farklı soğutma şartı denenerek, farklı soğutma şartlarının filament numarasına etkisi incelenmiştir. Atık HDPE için 2,5 dev/dak üretim hızında ortam sıcaklığında (24 ± 2 °C) hava üfleme, sıcak sudan (70-80 °C) geçirme ve soğuk sudan (17-19 °C) geçirme şartları altında, düzeden çıkan eriyik polimer soğutulmuştur. Soğutma şartları saf HDPE üretimindeki gibidir ve Çizelge 4.5'te verilmiştir.

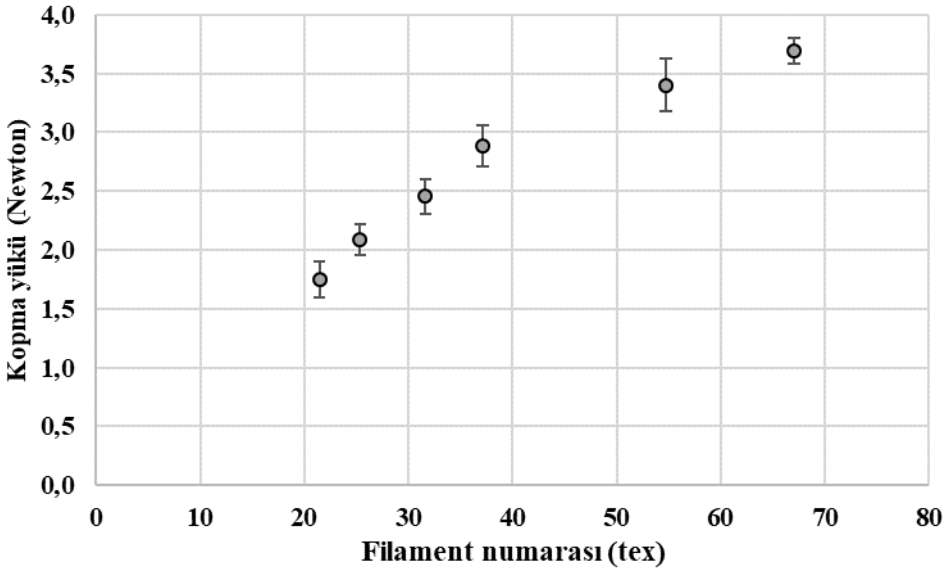
Şekil 4.5'te soğutma şartlarının atık HDPE filament numarasına etkisi verilmiştir. Filament numaralarının birbirinden çok farklı olmadığı görülmektedir. Yine de soğutma şartları filament numarasını etkilemiştir. Ancak saf HDPE sonuçlarındakine benzer bir durum ortaya çıkmamıştır. Filamenti sudan geçirmek, filament numarasında az da olsa bir artışa sebep olmuştur. Atık HDPE filamentin bu davranışı malzemedeki varyasyondan kaynaklandığı düşünülmektedir. Atık malzeme tek tip olmayıp çok farklı kaynaklardan toplanmıştır. Bu malzeme varyasyonunun da, soğutma şartlarının filament numarasına etkisinde görüldüğü düşünülmektedir.



Şekil 4.5. Soğutma şartlarının atık HDPE filament numarasına etkisi

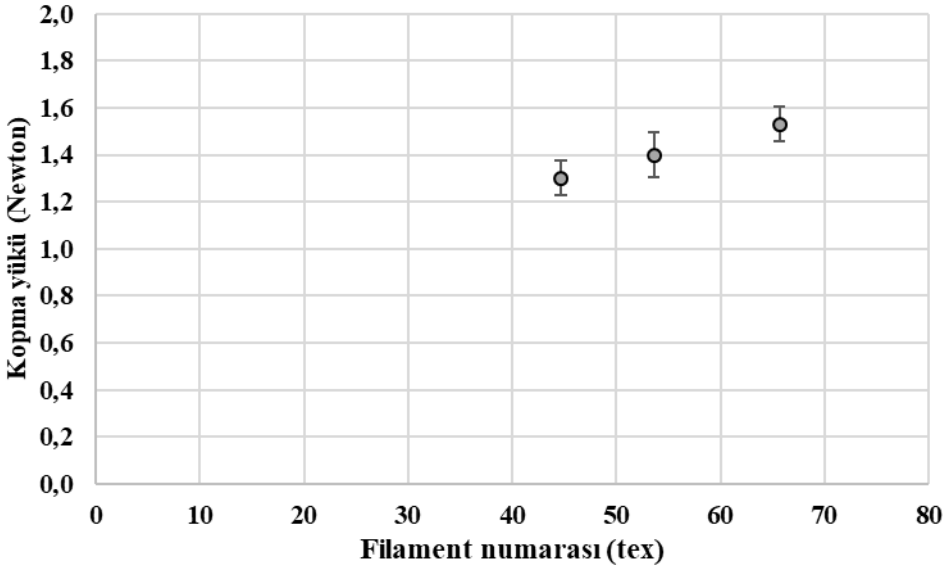
4.4. Filament Numarasının Kopma Yüküne Etkisi

Hem saf hem de atık HDPE filament üretiminde, ekstrüder hızlarının değiştirilmesi neticesinde farklı numaralarda filamentler üretilmiştir. Üretilen bu filamentler çekme testine tabi tutulmuştur. Şekil 4.6'da saf HDPE polimerinden üretilen filamentlerin farklı numaralardaki kopma yükü değerleri verilmiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere filament numarası artışı ile kopma yükünde artış görülmektedir. Bunun yanında bazı ortalama kopma yükü değerlerindeki yakınlık ve standart sapmanın da varlığı sebebiyle istatistiki analiz yapma gerekliliği doğmuştur. Tüm kopma yükü sonuçları için birbirinden bağımsız grup verileri arasında istatistiki olarak bir fark olup olmadığını anlamak için α=0,05 anlamlılık seviyesi için varyans analizi (ANOVA) F-testi uygulanmıştır. Daha sonra bireysel gruplar arasında doğrudan karşılaştırmalar yapan LSD (en az anlamlı fark) testi uygulanmıştır (α =0.05). Her kopma yükü değeri birbirinden farklı çıkmıştır. Kopma yükünde görülen artış istatistiksel olarak da anlamlıdır.



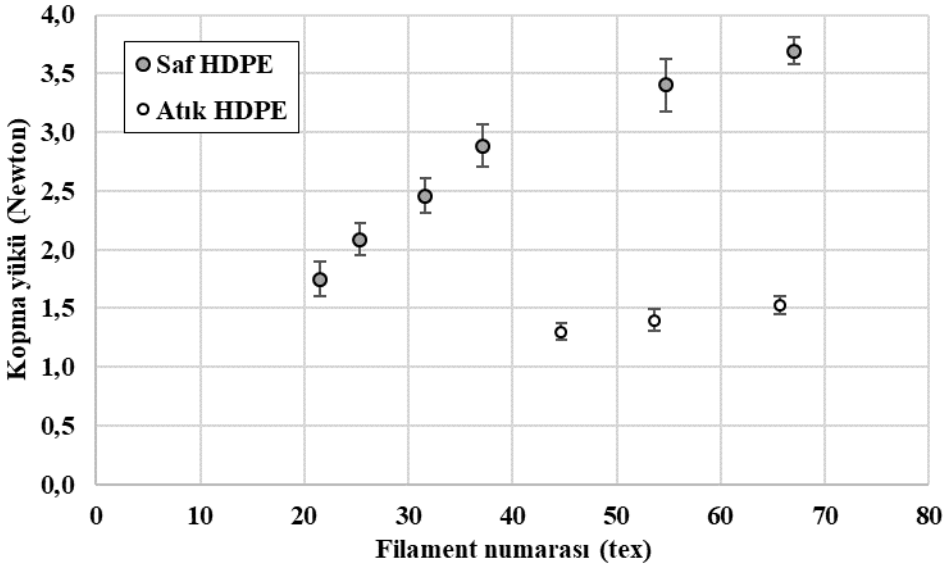
Şekil 4.6. Saf HDPE filamentlerin kopma yükü değerleri

Şekil 4.7'de atık HDPE polimerinden üretilen filamentlerin farklı numaralardaki kopma yükü değerleri verilmiştir. Saf HDPE sonuçlarındaki gibi, filament numarası artışı ile kopma yükünde artış görülmektedir. Ancak bazı yakın değerler standart sapmanın da varlığı sebebiyle istatistiki analiz yapma gerekliliği doğmuştur. Tüm kopma yükü sonuçları için birbirinden bağımsız grup verileri arasında istatistiki olarak bir fark olup olmadığını anlamak için α=0,05 anlamlılık seviyesi için varyans analizi (ANOVA) F-testi uygulanmıştır. Daha sonra bireysel gruplar arasında doğrudan karşılaştırmalar yapan LSD (en az anlamlı fark) testi uygulanmıştır (α =0.05). Her kopma yükü değeri birbirinden farklı çıkmıştır. Kopma yükünde görülen artış istatistiksel olarak da anlamlıdır.



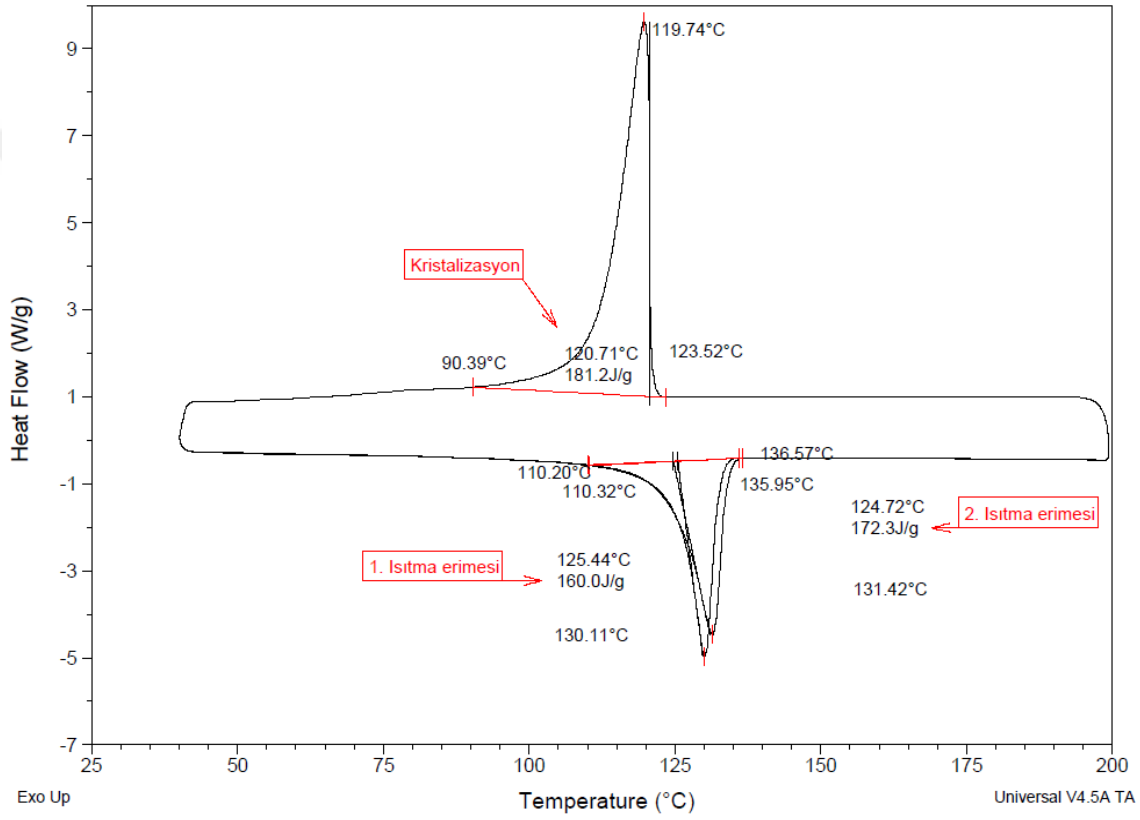
Şekil 4.7. Atık HDPE filamentlerin kopma yükü değerleri

Şekil 4.8'de saf ve atık HDPE polimerinden üretilmiş filamentlerin kopma yükü değerleri bir arada gösterilerek bir kıyas yapılması amaçlanmıştır. Görüldüğü gibi saf HDPE polimerinden üretilen filamentlerin kopma yükü değerleri atık HDPE polimerinden üretilen filamentlerden daha yüksektir. En ince saf HDPE filamentinin kopma yükü dahi en kalın atık HDPE filamentinin kopma yükünden daha yüksek çıkmıştır.

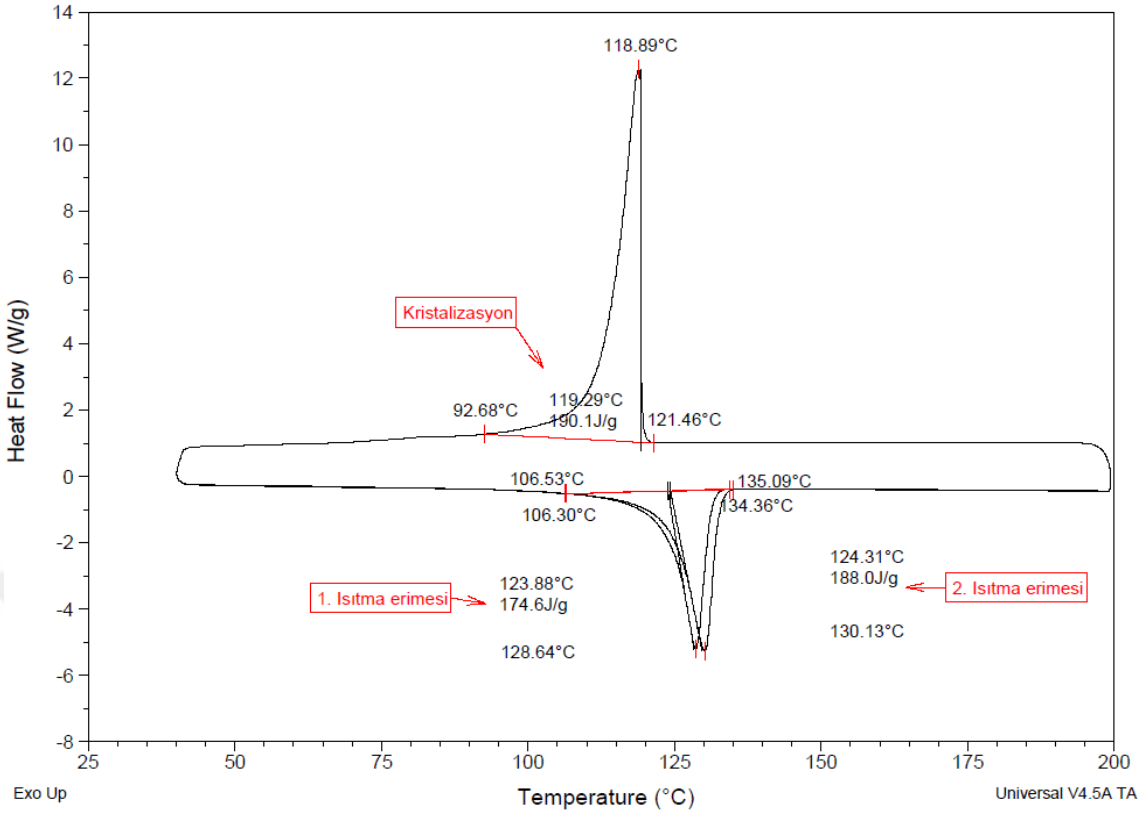


Şekil 4.8. Saf ve atık tüm filamentlerin kopma yükü değerleri

Atık ve saf polimerden üretilen her iki filament grubu da aslında aynı polimer (HDPE) olmasına rağmen ve aynı makine üretim parametrelerinde elde edilmelerine rağmen kopma yükü değerlerindeki bu farklılığın sebebini araştırmak için polimerlerin içyapılarının analizine ihtiyaç vardır. Bunun için hem saf HDPE, hem de atık HDPE polimerinden üretilen filamentler DSC testine tabi tutulmuştur. Şekil 4.9'da 3,96 mg ağırlığındaki saf HDPE filamentin, Şekil 4.10'da ise 3,27 mg ağırlığındaki atık HDPE filamentin DSC test sonucu verilmiştir.



Şekil 4.9. Saf HDPE filament DSC testi sonucu (sıcaklık-ısı akış grafiği)



Şekil 4.10. Atık HDPE filament DSC testi sonucu (sıcaklık-ısı akış grafiği)

Saf ve atık HDPE filamentlerinin DSC testi sonucunda elde edilen önemli termal değerleri Çizelge 4.6'da özetlenmiştir. Buna göre 1. erime sıcaklığı ve pik noktası, 2. erime sıcaklığı ve pik noktası değerleri sırasıyla 125 °C ve 130 °C civarındadır. Saf ve atık polimerlerin bu değerler bakımından aralarında 1 °C fark gözükmektedir. Kristalizasyon sıcaklık değerleri de 120 °C de civarında birbirine çok yakınıdır. Saf ve atık HDPE polimerleri arasında dikkat çeken önemli farklılık lif formundan ilk erimeye maruz kaldığı 1. ısıtma enerjisinde görülmektedir. Saf HDPE polimer için 1. ısıtma enerjisi 160 J/g, atık HDPE polimeri için ise 175 J/g ölçülmüştür. Atık HDPE polimerinin erimesi esnasında birim kütle başına daha fazla ısı enerjisi verilmiştir.

Çizelge 4.6. Filamentlerin DSC testi sonucundaki termal değerleri

Numune Kodu		Saf PE	Atık PE
Parametre	Birim	Sonuç	Sonuç
1. Isıtma erime pik noktası	°C	130	129
1.Isıtma erime sıcaklığı	°C	125	124
1.Isıtma erime enerjisi	J/g	160	175
2. Isıtma erime pik noktası	°C	131	130
2.Isıtma erime sıcaklığı	°C	125	124
2.Isıtma erime enerjisi	J/g	172	188
Kristalizasyon pik noktası	°C	120	119
Kristalizasyon sıcaklığı	°C	121	119
Kristalizasyon enerjisi	J/g	181	190

Çizelge 4.6'daki 1. ısıtma enerjisi değerleri, teorik olarak %100 kristalin HDPE polimerini eritmek için verilen ısı enerji değerleri ile oranlanarak bu çalışmadaki saf ve atık polimerlerin kristalizasyonunu hesaplamak mümkündür. Bunun için denklem 3.1 kullanılabilir.

$$K = \frac{\Delta H_{erime}}{\Delta H_{lit}} \qquad \text{.....(3.1)}$$

Denklem 3.1'de K: kristalizasyon derecesi, ΔH_{erime}: ölçülen erime entalpisi, ΔH_{lit}: tümüyle kristalin malzemenin referans erime entalpisidir (NETZSCH GmbH, 2023). %100 kristalin PE polimerinin erime entalpi değeri literatürde 293,6 J/g olarak verilmiştir (InstaNANO, 2023; NETZSCH GmbH, 2023).

3.1 numaralı denkleme göre saf HDPE filamentinin kristalizasyonu %54,5 , atık HDPE filamentinin kristalizasyonu ise %59,6 hesaplanmıştır. Atık HDPE filamentinin kristalizasyon değerinin yüksek çıkması, malzemenin düşük kopma yükü değerleri değerlendirildiğinde pek beklenen bir durum değildir. Çünkü plastiklerin özellikleri, kristalleşme derecelerinden önemli ölçüde etkilenir. Kristalleşme derecesi ne kadar yüksek olursa, üretilen malzeme o kadar sert ve güçlü ama aynı zamanda daha kırılgan

olur (NETZSCH GmbH, 2023). Bununla birlikte, özellikler yalnızca kristalizasyon derecesiyle değil, aynı zamanda yapısal birimlerin boyutuyla ve moleküler oryantasyonla da belirlenir (NETZSCH GmbH, 2023).

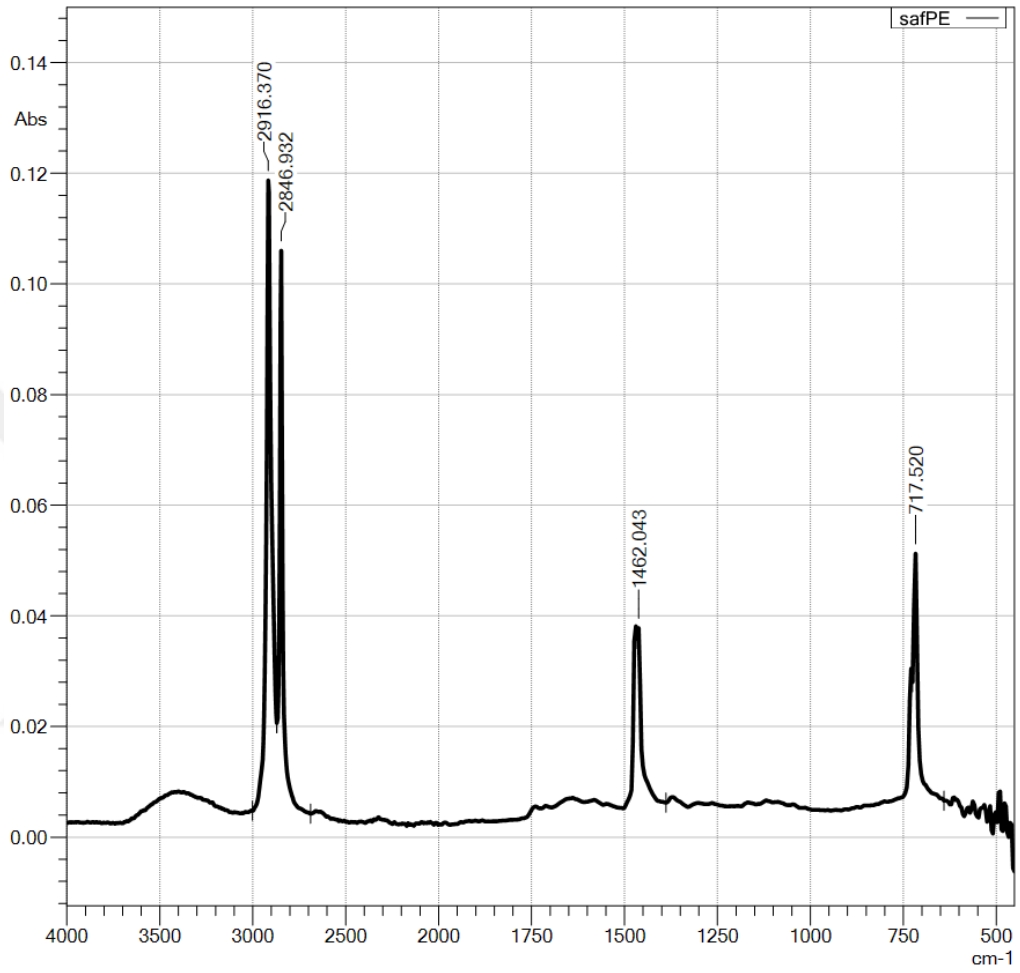
Atık HDPE polimeri, atık bir plastik olarak çevreden toplandığından, her ne kadar malzemenin HDPE olduğu bilinse de FTIR testi yapılarak malzeme içyapısı ile ilgili daha fazla bilgi edinilmesi amaçlanmıştır. Polimerde olası safsızlıklar veya katkı maddeleri olma ihtimali vardır. Özellikle katkı maddeleri polimerde çekirdeklenmeyi teşvik edebilmektedir (Menges, Haberstroh, Michaeli, & Schmachtenberg, 2002).

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de sırasıyla saf HDPE ve atık HDPE filamentlerin ATR-FTIR spektraları verilmiştir. Ölçüm yapılan dalga sayısı aralığı 450-4000 cm^{-1} dir. 2847 cm^{-1} ve 2916 cm^{-1} daki absorbsiyon bantları PE'deki CH_2 (metilen) ünitelerinde sırasıyla simetrik ve asimetrik gerilmelere tekabül etmektedir (da Silva & Wiebeck, 2018; Smith, 2021a, 2021b).

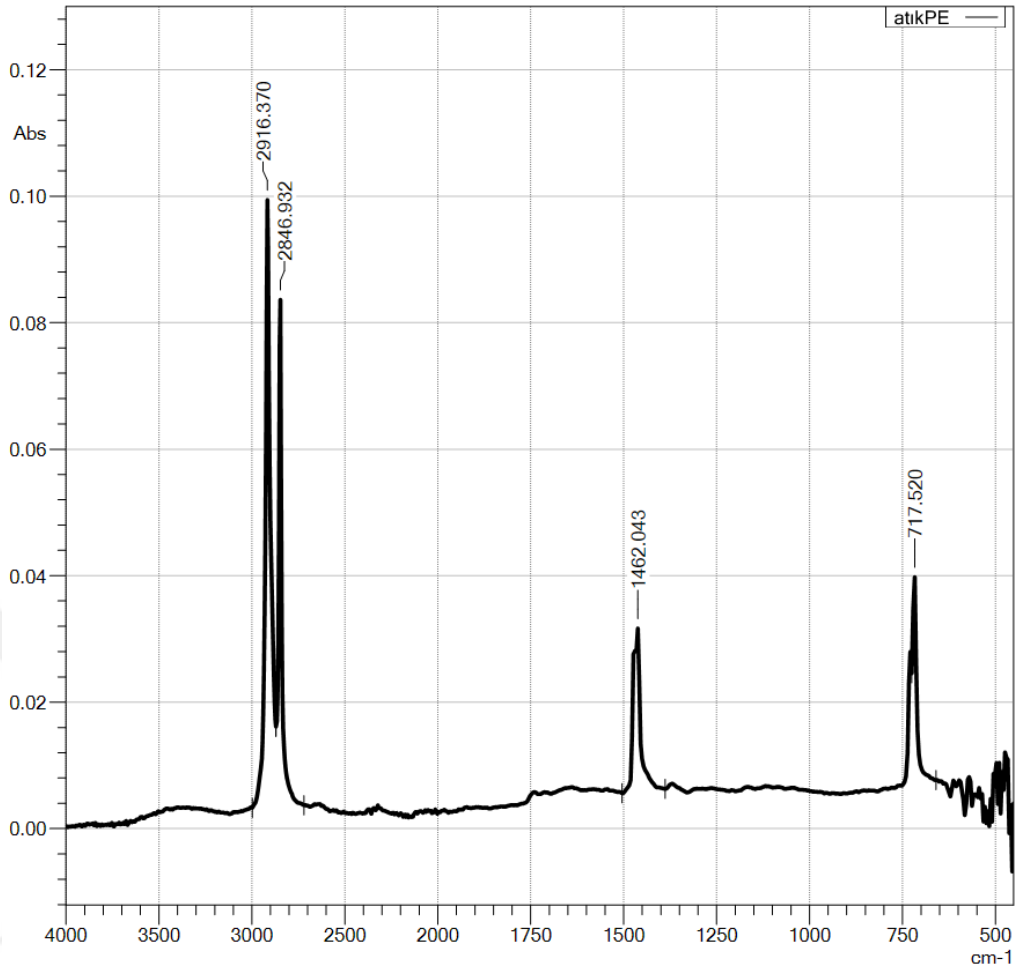
1375±10 dalga sayısı aralığında C-CH_3 (metil) simetrik eğilme titreşimleri görülmesi, yan zincirlerin varlığına ve dolayısıyla LDPE varlığına işaret ettiği literatürde verilmektedir (Smith, 2021a). Bununla beraber kısa molekül zincirli PE polimerinde -CH_3 (metil) grubu fazla olması beklentisiyle 1375±10 cm^{-1} dalga sayısında bir pik beklenebilir. Ancak atık ve saf HDPE filamentlerin FTIR testi sonuçlarında belirtilen dalga sayısında ayırt edici bariz bir fark görülmemiştir. CH_2 ünitelerinde tekabül eden gerilme pikleri, 1375±10 cm^{-1} dalga sayısındaki pikleri bastırdığı için bir fark görülemediği düşünülmektedir (Smith, 2021a).

LDPE polimerinin 718 cm^{-1} dalga sayısında tek bir pik yapması beklenir (Smith, 2021a). Ancak HDPE polimerinde bu dalga sayısı civarında karakteristik iki pik mevcuttur (Smith, 2021b). Amorf fazlar içerisindeki -CH2- gruplarının rocking (sallanma) hareketleri 719 cm^{-1} de, kristalin fazlardaki -CH2- gruplarının sallanma (rocking) hareketleri ise 729 cm^{-1} de görülmektedir (da Silva & Wiebeck, 2018; Uslu, 2019). Hem atık hem de saf HDPE polimerlerinde 718 cm^{-1} ve 729 cm^{-1} dalga sayısında olmak üzere iki pik görülmesi, çalışmada kullanılan bilhassa atık malzemenin HDPE olduğunu

doğrulamaktadır. Ayrıca pik şiddetlerindeki (729 cm^{-1} deki pik şiddeti / 718 cm^{-1} deki pik şiddeti) oran atık HDPE polimerinde daha yüksek çıkmıştır ki, atık HDPE filamentin daha kristalin olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.



Şekil 4.11. Saf HDPE filamenti FTIR testi sonucu



Şekil 4.12. Atık HDPE filamenti FTIR testi sonucu

Daha öncede bahsedildiği gibi, kristalizasyon derecesi ne kadar yüksek olursa, malzeme o kadar sert ve güçlü ama aynı zamanda daha kırılgan olur (NETZSCH GmbH, 2023). Ancak, özellikler yalnızca kristalizasyon derecesiyle değil, aynı zamanda yapısal birimlerin boyutuyla ve moleküler oryantasyonla da belirlenir (NETZSCH GmbH, 2023). Kristalizasyonu az da olsa daha düşük olan saf HDPE filamentlerinin çok daha yüksek kopma yükü değerlerine sahip olmasının molekül zinciri uzunluğu ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Nitekim saf ve atık polimerlere yapılan eriyik akış hızı (MFR) testlerinde, saf HDPE polimerin eriyik akış hızı daha düşük çıkmıştır (bakınız Çizelge 4.3). MFR değerinin düşük çıkması saf polimerin eridiğinde viskozitesinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir. FTIR testlerine göre tekrar ünitelerinin yapısı aynı olan saf ve atık HDPE polimerlerinin MFR ve dolayısıyla eriyik viskozitelerindeki bu ciddi fark, saf

HDPE filamentlerinin yüksek kopma yükü değerlerinin, saf polimerin sahip olduğu daha uzun molekül zinciri sebebiyle gerçekleştiği fikrini kuvvetlendirmektedir.

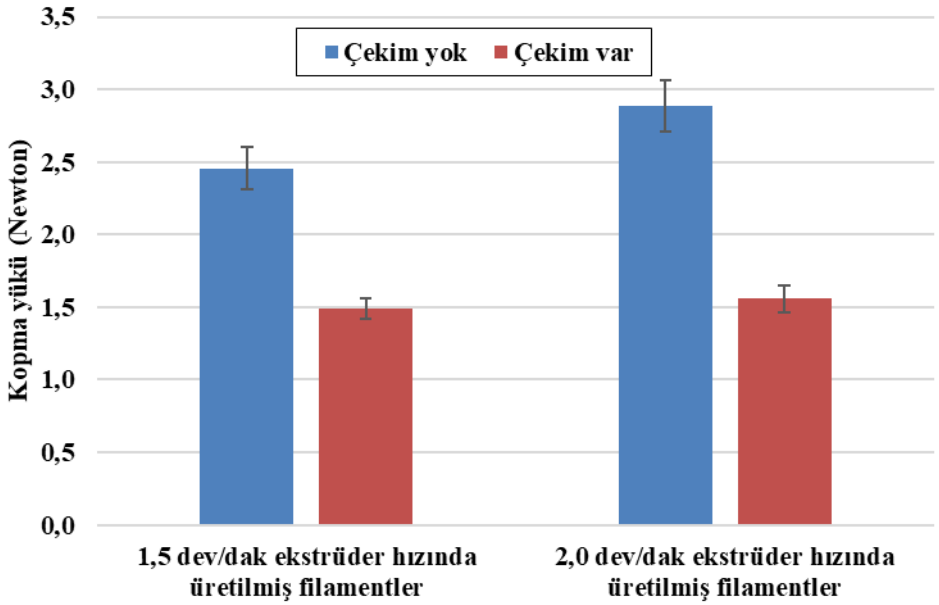
4.5. HDPE Filament Üretiminde Çekimin Kopma Yükü ve Mukavemete Etkisi

Çalışmanın bu kısmında, HDPE filament üretiminde çekim işleminin filamentin kopma yükü ve mukavemetine etkisi incelenmiştir. HDPE filament üretiminde çekim verebilmek için sarıcı silindirin hızı arttırılarak, godet ile sarıcı silindir arasında bir çekim oluşturulmuştur. Çizelge 4.7'de çekim verilen ve verilmeyen filamentlerin üretim bilgileri verilmiştir. Sarım silindiri hızının godet silindiri hızına oranı filamente verilen çekim değeridir.

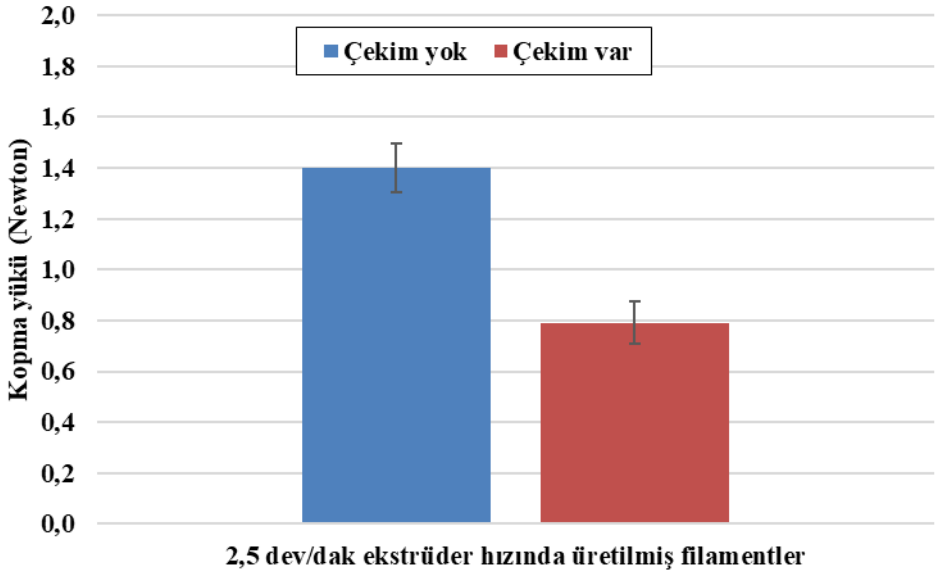
Çizelge 4.7. Ekstrüder hızları ve çekim değerleri

Kullanılan polimer	Ekstrüder motor hızı (dev/dak)	Çekim değeri
Saf HDPE	1,5	1,0
Saf HDPE	1,5	1,5
Saf HDPE	2	1,0
Saf HDPE	2	1,5
Atık HDPE	2,5	1,0
Atık HDPE	2,5	1,5

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te sırasıyla saf ve atık HDPE polimerinden üretilen filamentlerin kopma yüküne, çekimin etkisi verilmiştir. Her iki grafikte de, çekim verilen filamentlerin kopma yükü değerlerinde düşüş görülmüştür. Bu beklenebilecek bir durumdur, çünkü çekimle beraber iplik numaralarında düşüş olmuştur (bakınız Şekil 4.3). Başka bir deyişle çekimle filamentler daha ince hale gelmiştir. Dolayısıyla çekimin filament içyapısındaki etkisi ve mekanik etkisini görebilmek için birim inceliğin kopma yükü olarak tarif edilebilecek mukavemet değerlerini vermek daha uygun olur.



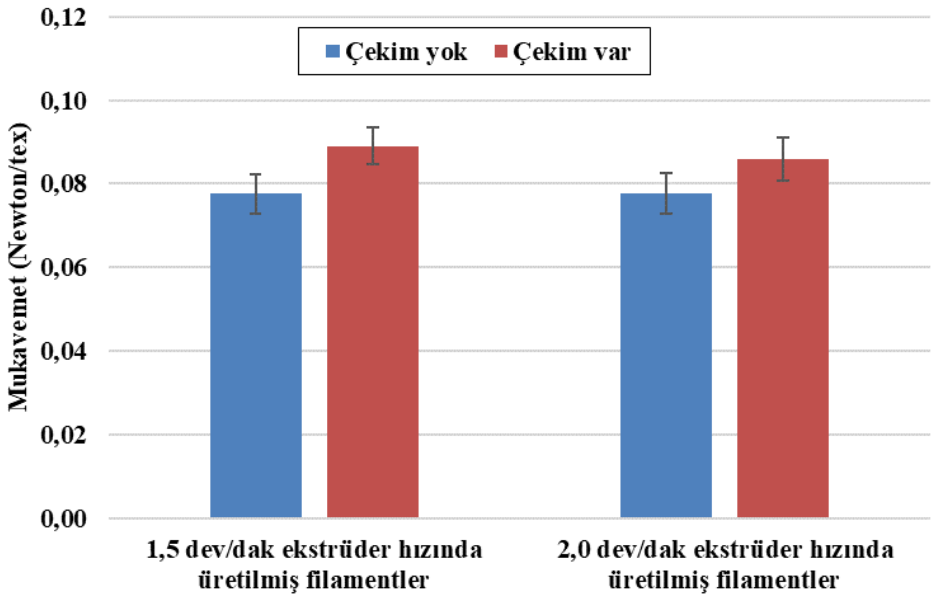
Şekil 4.13. Çekimin saf HDPE filamentlerin kopma yüküne etkisi



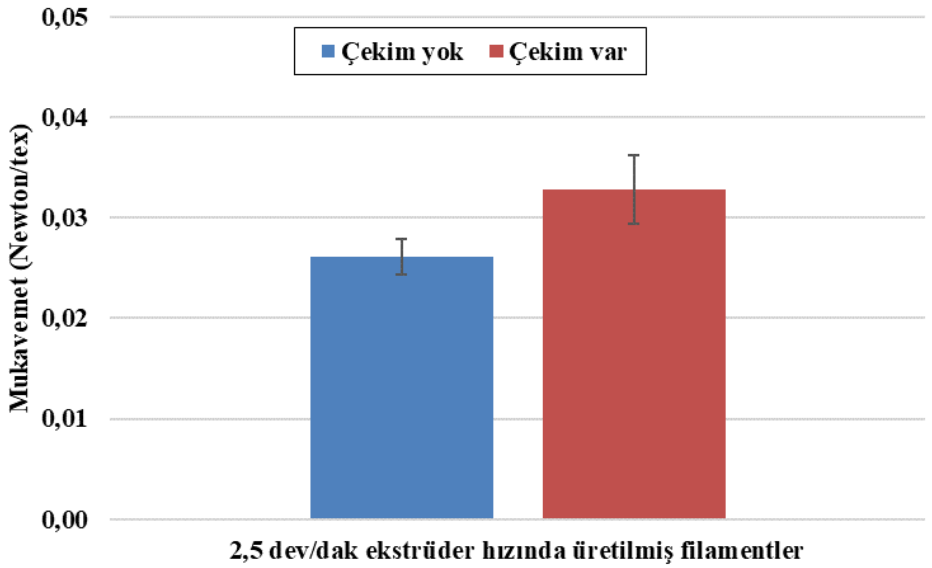
Şekil 4.14. Çekimin atık HDPE filamentlerin kopma yüküne etkisi

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da görüldüğü gibi çekim verilen filamentlerin mukavemet değerlerinin daha yüksek çıktığı görülmektedir. Sonuçların istatistiki analizi için, ANOVA F-testi ve ardından LSD testi uygulanmıştır (α =0.05). İstatistiki olarak da çekim işlemi mukavemeti arttırmıştır. Çekimin özellikle molekül zincirleri oryantasyonunu arttırarak mukavemet değerini yükselttiği değerlendirilmektedir. Şekil 4.15'te, çekim verilmeyen 31,6 tex (1,5 dev/dak ekstrüder hızında üretilmiş filament) ve 37,1 tex (2,0

dev/dak ekstrüder hızında üretilmiş filament) filamentlerin mukavemet değerleri istatistiki olarak aynı çıkmıştır. Çekim verilen 16,7 tex (1,5 dev/dak ekstrüder hızında üretilmiş filament) ve 18,2 tex (2,0 dev/dak ekstrüder hızında üretilmiş filament) filamentlerin mukavemet değerleri de istatistiki olarak aynı çıkmıştır. Bu beklenen bir durumdur. Çünkü filament numarasının kopma yüküne etkisi var, ancak mukavemete etkisi yoktur.



Şekil 4.15. Çekimin filament mukavemetine etkisi (saf HDPE)



Şekil 4.16. Çekimin filament mukavemetine etkisi (atık HDPE)

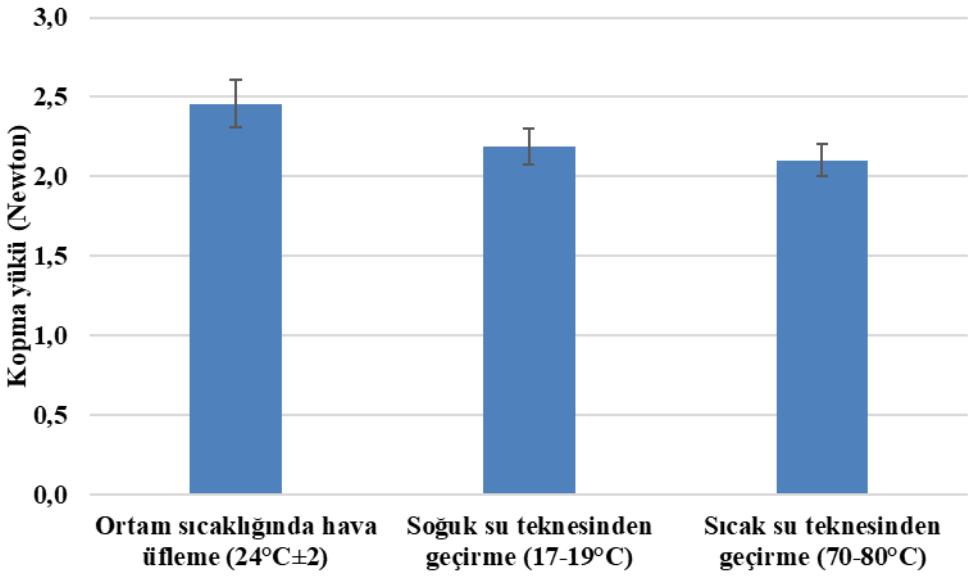
4.6. Soğutma Şartlarının HDPE Filament Kopma Yükü ve Mukavemetine Etkisi

HDPE filamentlerin üretiminde üç farklı soğutma şartı denenmiştir. Saf HDPE için 1,5 dev/dak, atık HDPE için 2,5 dev/dak üretim hızında, ortam sıcaklığında (24 ± 2 °C) hava üfleme, sıcak sudan (70-80 °C) geçirme ve soğuk sudan (17-19 °C) geçirme şartları altında, düzeden çıkan eriyik polimer soğutulmuştur. Çizelge 4.8'de soğutma şartları verilmiştir. Buradaki amaç, farklı soğutma şartlarında üretilen HDPE filamentlerin, kopma yükü ve mukavemetlerinin incelenmesidir.

Çizelge 4.8. HDPE filament üretiminde farklı soğutma şartları

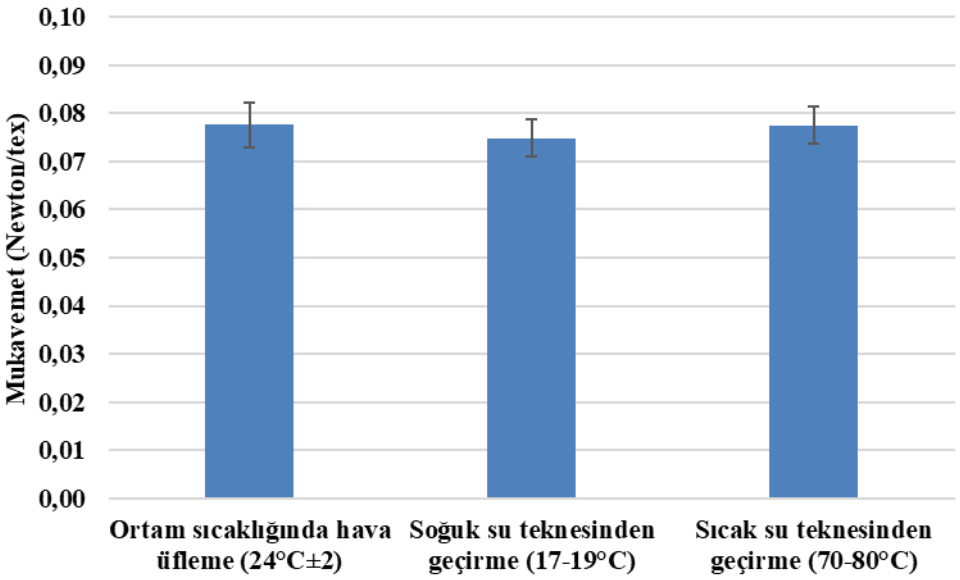
Filament soğutma yöntemi:	Soğutma derecesi:
Ortam sıcaklığında hava üfleme	24 ± 2 °C
Sıcak su teknesinden geçirme	70-80 °C
Soğuk su teknesinden geçirme	17-19 °C

Şekil 4.17'de soğutma şartlarının saf HDPE filament kopma yükü değerine etkisi verilmiştir. Şekil 4.15 incelendiğinde hava üfleme ile soğutma şartlarında kopma yükü değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuç istatistiki olarak da anlamlıdır. Ancak bu filamentin daha kalın olduğu hatırlatılmalıdır. Soğutma şartlarının etkisini daha net görebilmek için birim inceliğin kopma yükü olarak tarif edilebilen mukavemet değerlerini incelemek gereklidir.

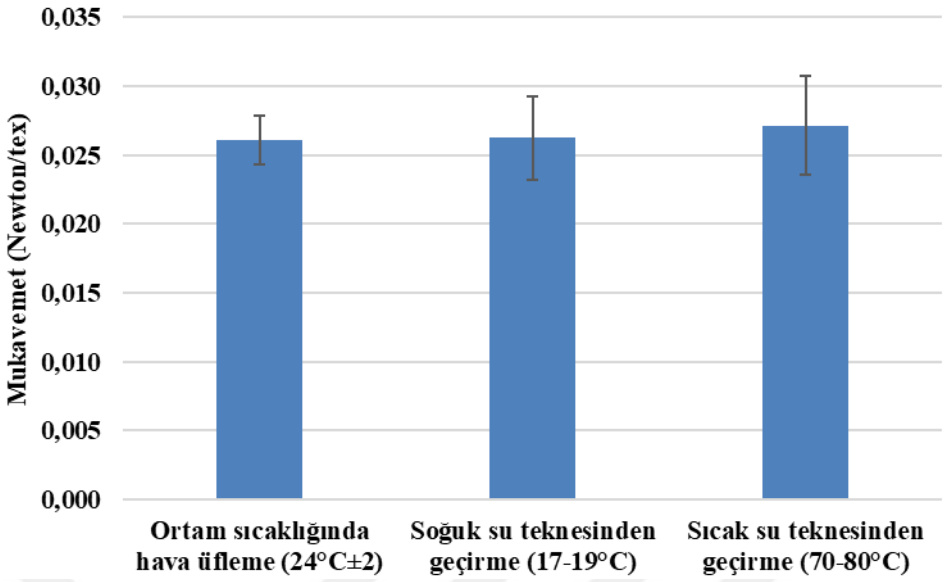


Şekil 4.17. Soğutma şartlarının kopma yüküne etkisi

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da soğutma şartlarının sırasıyla saf ve atık HDPE polimerinden üretilen filamentlerin mukavemetine etkisi verilmiştir. Farklı soğutma şartlarının istatistiki (ANOVA F-testi ve LSD testine göre) olarak mukavemete bir etkisi olmamıştır.



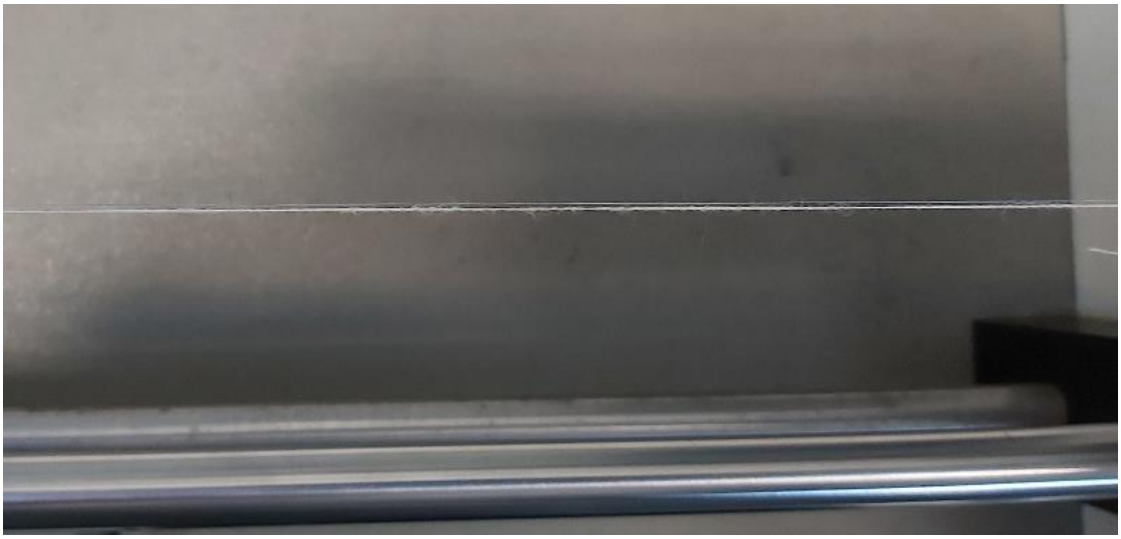
Şekil 4.18. Soğutma şartlarının mukavemete etkisi (saf HDPE)



Şekil 4.19. Soğutma şartlarının mukavemete etkisi (atık HDPE)

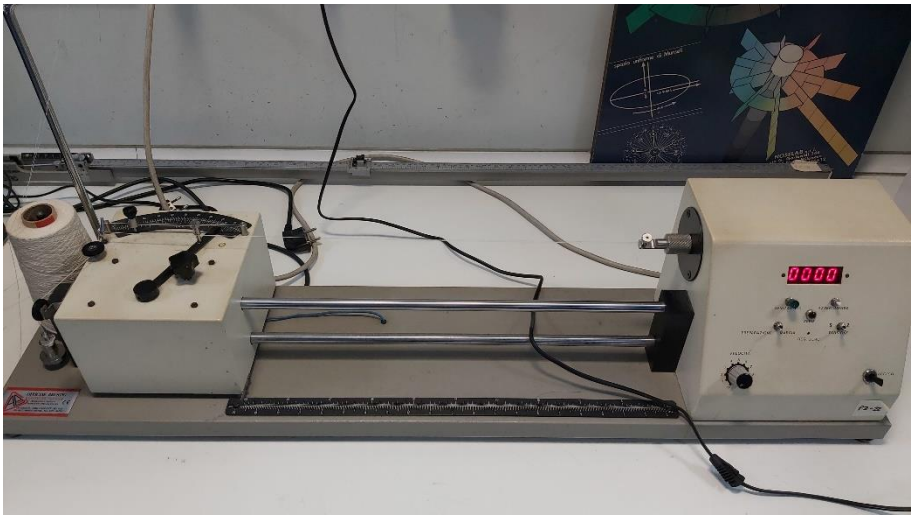
4.7. Hibrit İpliklerin Oluşturulması

Çalışmanın bu kısmında, mukavemeti saf HDPE polimerinden üretilen filamentlere göre düşük olan atık HDPE polimerinden üretilmiş filamentlerin, başka bir iplik ile bükülerek hibrit iplik oluşturulması amaçlanmıştır. Böylece atık HDPE polimerinden üretilmiş filamentlerin de kumaş üretiminde kullanılabilecek bir dayanım ve form kazanması hedeflenmektedir. Hibrit iplik oluşumu için Ne 16/1 numarada 551 t/m büküm değerine sahip Z büküm, ring iplik üretim yöntemiyle üretilmiş pamuk ipliği seçilmiştir. Ne 16/1 iplik numarası tex numaralandırma sisteminde 36,9 tex e karşılık gelmesi bakımından bu numaraya en yakın numarada filamentler hem saf HDPE, hem de atık HDPE polimerinden üretilen filamentlerden seçilmiştir. Buna göre 2 dev/dak ekstrüder hızında üretilen saf HDPE polimerinden 37,1 tex, atık HDPE polimerinden de 44,7 tex numaraya sahip filamentler hibrit iplik oluşumu için tercih edilmiştir.

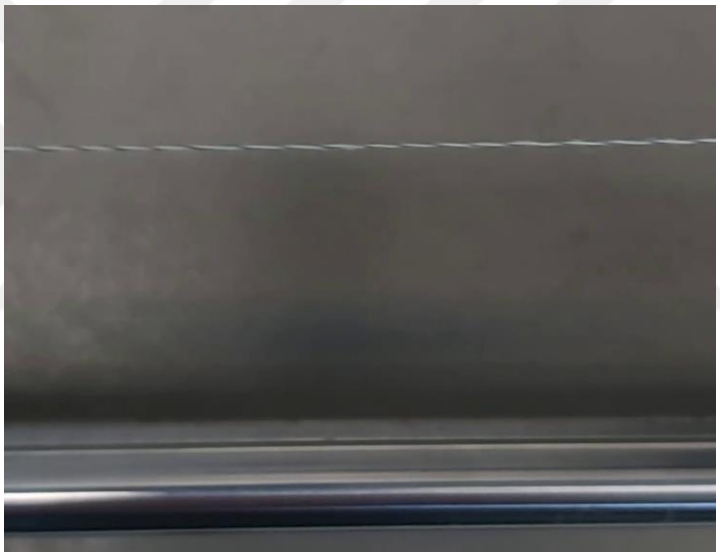


Şekil 4.20. Pamuk ipliği ve atık HDPE filamenti

Ne 16/1 numarada 551 t/m büküm değerine sahip pamuk ipliği, 44,7 tex numarada atık plastikten üretilmiş bükümsüz HDPE filamenti ile yan yana getirilerek (Şekil 4.20) Officine Brustio (menşei: İtalya) marka büküm cihazında (Şekil 4.21) pamuk ipliği ile aynı büküm yönünde (Z yönünde) 200 t/m büküm verilmiştir. Oluşturulan hibrit ipliğin makine üzerindeki görüntüsü Şekil 4.22'deki gibidir. Benzer şekilde ve kıyaslama yapabilmek için Ne 16/1 numarada 551 t/m büküm değerine sahip pamuk ipliği, 37,1 tex numarada saf polimerden üretilmiş HDPE filamenti ile yan yana getirilerek büküm cihazında pamuk ipliği ile aynı büküm yönünde (Z yönünde) 200 t/m büküm verilmiştir. Hibrit iplik oluşumun getirdiği olası iyileşmeyi tam olarak tespit edebilmek ve doğru bir kıyaslama yapabilmek için Ne 16/1 numarada 551 t/m büküm değerine sahip pamuk ipliği tek başına iken de büküm cihazına yerleştirilmiş ve aynı büküm yönünde (Z yönünde) 200 t/m büküm daha verilerek, neticede 751 t/m büküme getirilmiştir. Hibrit ipliklere ve fazladan büküm verilen pamuk ipliklerine büküm cihazından çıkarılmadan önce 2 dakika süresince sıcak hava üflenerek, bükümün geri açılması engellenmiş ve bükümün sabitlenmesi sağlanmıştır.



Şekil 4.21. Büküm cihazı



Şekil 4.22. Makine üzerinde oluşan hibrit iplik

4.8. Hibrit İpliklerin Kopma Yükü ve Kopma Uzaması Sonuçları

Kopma yükü testi için Çizelge 4.9'da bilgileri verilen referans ipliklerin ve hibrit ipliklerin ISO 2062:2009 standardına göre, 20'şer adet numunelerinin kopma yükü testleri gerçekleştirilmiştir. Tüm kopma yükü sonuçları için birbirinden bağımsız grup verileri arasında istatistiki olarak bir fark olup olmadığını anlamak için α=0,05 anlamlılık seviyesi için ANOVA F-testi gerçekleştirilmiştir. İstatistik sonuçlarına göre, test edilen gruplardan en az biri diğer gruplardan farklılık göstermiştir. Ardından bireysel gruplar

arasında doğrudan karşılaştırmalar yapan LSD (en az anlamlı fark) istatistik testi uygulanmıştır (α=0.05).

Çizelge 4.9. Referans iplikler ve hibrit ipliklerin bileşenleri

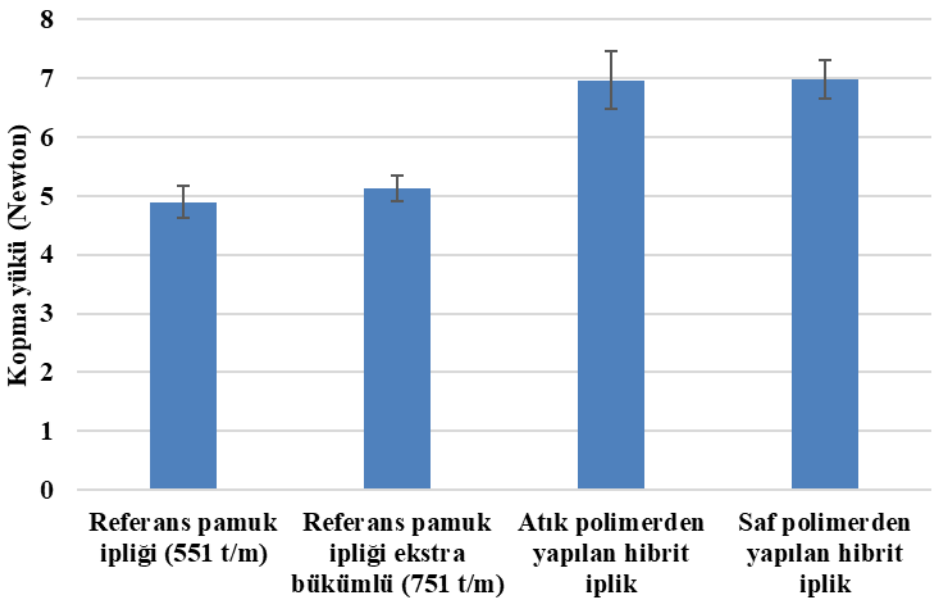
İplik ismi	Hibrit iplik bileşenleri	
	1. İplik bileşeni	2. İplik bileşeni
Referans pamuk ipliği (551 t/m)	Ne 16/1 Pamuk ipliği	-
Referans pamuk ipliği ekstra bükümlü (751 t/m)	Ne 16/1 Pamuk ipliği	-
Atık polimerden yapılan hibrit iplik	Ne 16/1 Pamuk ipliği	44,7 tex atık HDPE filament
Saf polimerden yapılan hibrit iplik	Ne 16/1 Pamuk ipliği	37,1 tex saf HDPE filament

Şekil 4.23'de, Çizelge 4.9'da bileşenleri verilen 4 farklı ipliğin kopma yükü değerleri verilmiştir. Hibrit iplikler oluşturulurken pamuk ipliği de fazladan büküm aldığı için, hibrit ipliklerle referans pamuk ipliğini tam kıyaslayabilme adına referans pamuk ipliğine 200 t/m büküm daha verildiği önceki bölümde bahsedilmişti. İlk olarak fazladan büküm verilen pamuk ipliği ile referans pamuk ipliği kopma yükü sonuçları kıyaslandığında 4,89 Newton değerinden 5,12 Newton değerine istatistiki olarak anlamlı bir artış gözlemlenmiştir. Bu beklenebilecek bir sonuçtur. Çünkü kesikli liflerden yapılan iplikleri oluşturan lifler birbirlerine daha sıkı tutunabilmesi için daha sıkı paketlenmeye ihtiyaç duyarlar. Eğer iplik içindeki lifler paralel biçimde pozisyonlanıp, birbirlerine baskı yapmazlarsa, çekme kuvveti altında lifler birbirinden kolay sıyrılır ya da koparlar. Bu da düşük kopma yüküne neden olur. Lifleri bir iplik halinde bükme işlemi, lifler arası tutunmayı artırmaya ve daha güçlü, daha kararlı iplikler oluşturmaya yardımcı olur. Bunun nedeni, liflerin birlikte büküldüğünde birbirine kenetlenmesi ve tek tek liflerden sıkı bir yapı oluşturmasıdır. Büküm hareketi, her bir lifin diğerinin etrafına sarıldığı, sürtünme oluşturan ve liflerin daha sıkı bir şekilde bir arada tutulmasına yardımcı olan sarmal bir yapı oluşturur. Bu kenetlenme ve artan sürtünmenin bir sonucu olarak daha yüksek büküm seviyeleri genellikle daha güçlü ipliklerle sonuçlanır (Lord, 2003).

Şekil 4.23 incelenmeye devam edildiğinde, hem saf hem de atık HDPE polimerlerinden üretilen hibrit ipliklerin kopma yükü değerleri, hibrit olmayan referans pamuk ipliğine

göre yaklaşık % 42, ekstra bükümlü pamuk ipliğine göre yaklaşık % 36 oranında yüksek çıkmıştır. Böylelikle pamuk ve HDPE iplikleri yalnız hallerine göre, beraber hibrit iplik oluşturulduğunda dayanımları iyileşmiştir. Hibrit iplik oluşumu, özellikle düşük kopma yükü değerine sahip atık HDPE polimerinden üretilmiş filamentin, iyi bir dayanıma sahip hibrit ipliğin bir bileşeni olmasını sağlamıştır.

Atık polimerden üretilen hibrit iplik ile saf polimerden üretilen hibrit ipliğin kopma yükü değerleri kıyaslandığında, ortalama kopma yükü değerleri çok yakın çıkmıştır ve istatistiki olarak da sonuçlar arasında anlamlı bir fark tespit edilmemiştir. Bu sonuç, atık polimerden yapılan hibrit ipliğin, ortalama kopma yükü değerlerinde önemli bir fark olmaksızın, saf polimerden yapılan hibrit iplik kadar güçlü olduğunu göstermektedir.

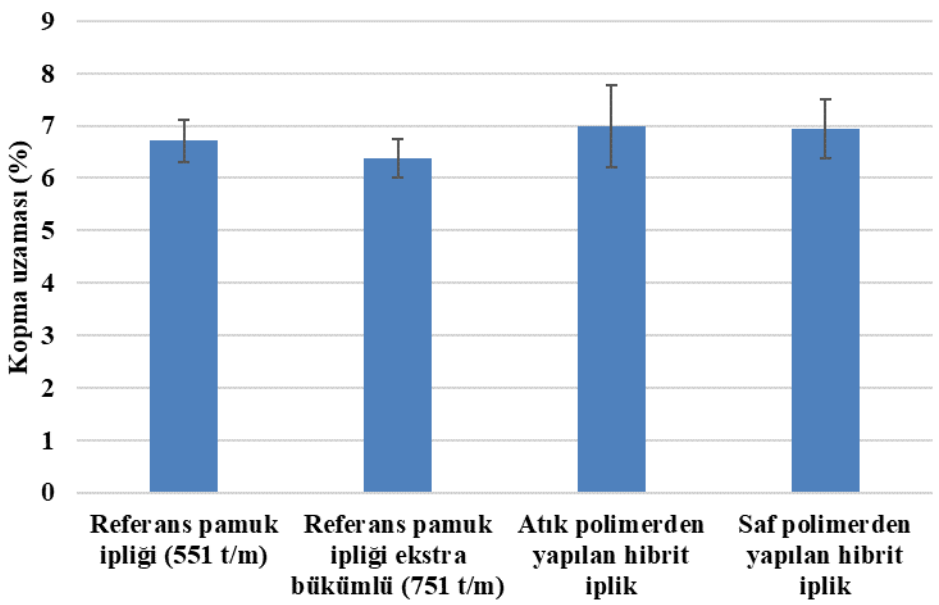


Şekil 4.23. Referans iplikler ve hibrit ipliklerin kopma yükü değerleri

Burada atık polimerden yapılan hibrit iplik açısından karşılaşılan bir diğer önemli sonuç ise, basitçe düşünüldüğünde iki iplikten oluşan hibrit iplik sisteminin kopma yükü değerinin, her bir bileşenin kopma yükü toplam değerinden, daha yüksek çıkmasıdır. Bu durumu biraz daha netleştirmek gerekirse, atık filament bileşeninin ortalama kopma yükü değeri 1,30 Newton, referans pamuk ipliği (ekstra bükümlü) bileşeninin ortalama kopma yükü değeri ise 5,12 Newton bulunmuştur. Her iki bileşenin toplam kopma yükü değeri 6,42 Newton yaparken, hibrit ipliğin ortalama kopma yükü değeri 6,96 Newton çıkmıştır.

Hibrit iplik formundaki bu iyileşme, bileşenlerin bir araya gelmesi neticesinde hibrit ipliğin daha düzgün ve homojen bir yapıya kavuşmasıyla açıklanabilir. Atık polimerden yapılan hibrit ipliğin kopma yükündeki bu iyileşme, saf polimerden yapılan hibrit ipliğin kopma yükünde bu seviyede görülmemiştir.

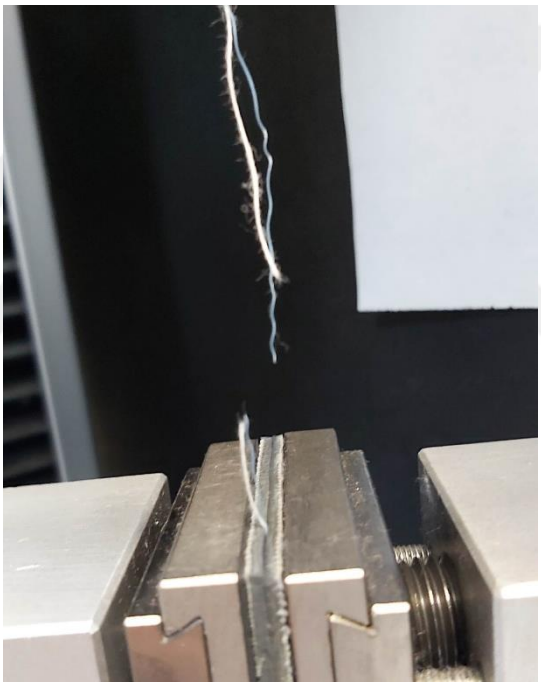
Atık polimerden oluşturulan hibrit iplikle, saf polimerden oluşturulan hibrit ipliklerin kopma yükü değerlerinin çok yakın çıkması, pamuk ipliğinin HDPE filamentlere göre daha az kopma uzaması değerine sahip olmasıyla aşağıdaki gibi ilişkilendirilebilir; Şekil 4.24'de Çizelge 4.9'da özellikleri verilen 4 farklı ipliğin kopma uzaması değerleri verilmiştir. Tüm sonuçlara bakıldığında, kopma uzaması değerleri birbirine epey yakındır ve %6,38 ile %6,99 arasında değişmektedir. Hâlbuki tek filament halinde hem atık hem de saf HDPE filamentlerin kopma uzama değerleri bu değerlerden çok fazladır. Sonuçlardan görüleceği üzere hibrit ipliklerin kopma uzaması değerleri daha az uzayan pamuk ipliği kopma uzamasına çok benzerdir. Bu durum mantıklıdır, çünkü mukavemet cihazının çenesi hibrit ipliği çekmeye başladığında az uzayan bileşen ilk olarak kopmaya sebep olacaktır. Bu durum testler esnasında da gözlemlenmiştir (Şekil 4.25).



Şekil 4.24. Referans iplikler ve hibrit ipliklerin kopma uzama değerleri

Ortalama % 6,99 kopma uzama değerinde kopan atık HDPE polimerinden yapılan hibrit ipliğin HDPE filament bileşeni, tek başına test edildiğinde bu uzama değerinde ortalama

0,87 Newton dayanım göstermektedir. Ortalama % 6,94 kopma uzama değerinde kopan saf HDPE polimerinden yapılan hibrit ipliğin HDPE filament bileşeni ise, tek başına test edildiğinde bu uzama değerinde ortalama 1,31 Newton dayanım göstermektedir. Aradaki fark 0,44 Newton'dur. Halbuki saf ve atık HDPE filamentlerin kopma yükü arasındaki fark daha önce verildiği üzere (bakınız Şekil 4.8) 1,58 Newton'du. Dolayısıyla hibrit ipliğin az uzaması nedeniyle saf ve atık HDPE polimerinden üretilmiş filamentlerin hibrit ipliğe dayanım açısından koydukları katkı bu düşük uzama değerlerinde birbirine yaklaşmıştır. Neticede saf ve atık HDPE polimerinden yapılan hibrit ipliklerin kopma yükü değerleri birbirine oldukça yakın çıkmıştır.



Şekil 4.25. Hibrit ipliğin test cihazında kopma sonrası görüntüsü

5. SONUÇ

Tez çalışmasında ilk olarak saf HDPE polimerinden filament üretimleri yapılmış ve farklı ekstrüder hızlarında filamentler üretilmiştir. Ekstrüder hızı arttıkça filament numarası doğrusal artış göstermiştir. Benzer doğrusal artış atık HDPE polimerinden üretilen filament üzerinde yapılan ölçümler neticesinde de görülmüştür. Böylece ekstrüder hızı artışı ile düzeye beslenen eriyik polimer miktarı kütlece doğru orantılı arttığı anlaşılmıştır.

Filament numarasına çekim işleminin etkisine bakıldığında çekim verilen filamentlerin numaralarında ciddi bir düşüş görülmüştür. Çekimle filamentler daha ince hale gelmiştir. Daha yüksek hızda filamentin çekilmesi, filament çapında azalmaya sebep olmuştur.

HDPE filamentlerin üretiminde üç farklı soğutma şartı (hava soğutma, su soğutma, sıcak su soğutma) denenerek, farklı soğutma şartlarının filament numarasına etkisi incelenmiştir. Farklı soğutma şartları için filament numaralarının birbirine yakın elde edildiği görülmektedir. Farklı soğutma şartlarının mukavemete de çok bir etkisi olmamıştır.

Hem saf hem de atık HDPE filament üretimleri neticesinde farklı numaralarda elde edilen filamentler çekme testine tabi tutulmuştur. Her iki malzeme için de filament numarası artışı ile kopma yükünde artış elde edilmiştir. Ancak atık ve saf polimerden üretilen her iki filament grubu da aslında aynı polimer (HDPE) olmasına rağmen, en ince saf HDPE filamentinin kopma yükü dahi en kalın atık HDPE filamentinin kopma yükünden daha yüksek çıkmıştır. Gerçekleştirilen iç-yapı analizleri neticesinde saf polimerden üretilen HDPE filamentlerin daha uzun molekül zincirlerine sahip olduğu düşünülmekte, bunun da kopma dayanımını arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Filament mukavemetine çekim işleminin etkisi incelendiğinde, çekim verilen filamentlerin mukavemetlerinde artış görülmüştür. Bu sonucun çekimle molekül zinciri oryantasyonundaki artışı nedeniyle olduğu değerlendirilmektedir.

Saf ve atık HDPE polimerinden üretilen filamentlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için pamuk ipliği ile bükülerek hibrit iplikler oluşturulmuştur. Atık polimerden üretilen hibrit iplik ile saf polimerden üretilen hibrit ipliğin kopma yükü değerleri kıyaslandığında, ortalama kopma yükü değerleri istatistiki olarak aynı çıkmıştır. Bu sonuç, atık polimerden yapılan hibrit ipliğin, ortalama kopma yükü değerlerinde önemli bir fark olmaksızın, saf polimerden yapılan hibrit iplik kadar güçlü olduğunu göstermektedir.

Hibrit ipliklerin kopma yükü değerleri, hibrit olmayan referans pamuk ipliğine göre yaklaşık %42, ekstra bükümlü pamuk ipliğine göre yaklaşık % 36 oranında yüksek çıkmıştır. Hibrit iplik oluşumu, özellikle düşük kopma yükü değerine sahip atık HDPE polimerinden üretilmiş filamentin, iyi bir dayanıma sahip hibrit ipliğin bir bileşeni olmasını sağlamıştır.

KAYNAKLAR

Alagirusamy, R., & Das, A. (2010). *Technical textile yarns*. (R. Alagirusamy & A. Das, Eds.), *Technical Textile Yarns*. Woodhead Publishing. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1533/9781845699475.1.140

Alagirusamy, R., Fangueiro, R., Ogale, V., & Padaki, N. (2006). Hybrid yarns and textile preforming for thermoplastic composites. *Textile Progress*, *38*(4), 1–71. https://doi.org/10.1533/tepr.2006.0004

Anonim. (2022). 2021'de Türkiye'de çıkan plastik atık miktarı yaklaşık 5 milyon 600 bin ton. https://www.dha.com.tr/gundem/2021de-turkiyede-cikan-plastik-atik-miktari-yaklasik-5-milyon-600-bin-ton-2049942

Aslan, R. (2018). Mikroplastikler. *Göller Bölgesi Aylık Hakemli Ekonomi ve Kültür Dergisi*, *6*(66), 61–67.

Çataloğlu, A. (2007). *Elastan karışımlı denim kumaşların elastikiyet ve kalıcı deformasyon özellikleri üzerine bir araştırma*. *Yüksek Lisans Tezi*. Ege Üniversitesi.

Christiani, C., Klason, C., & Shishoo, R. (1999). The Effect of Reprocessing of Polypropylene on Fiber Spinning. *Journal of Applied Polymer Science*, *73*(10), 1859–1867. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19990906)73:10<1859::AID-APP5>3.0.CO;2-B

Da Silva, D. J., & Wiebeck, H. (2018). CARS-PLS regression and ATR-FTIR spectroscopy for eco-friendly and fast composition analyses of LDPE/HDPE blends. *Journal of Polymer Research*, *25*(5), 112. https://doi.org/10.1007/s10965-018-1507-5

Durak, S. G. (2016). Investigation and Evaluation of the Effect to Environmental Pollution of Plastic Shopping Bags. *Turkish Journal of Scientific Reviews*, *9*(2), 20–24.

Francis, R. (2017). *Recycling of Polymers*. *Recycling of Polymers*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH.

Gönültaş, B. (2022). Dünya genelinde plastik atıkların sadece yüzde 9'u geri dönüştürülebiliyor. https://www.aa.com.tr/tr/cevre/dunya-genelinde-plastik-atiklarin-sadece-yuzde-9u-geri-donusturulebiliyor/2510128

Gourmelon, G. (2015). Global Plastic Production Rises, Recycling Lags. *Vital Signs*, *22*, 91–95.

Gregor-svetec, D., Tišler-Korljan, B., Leskovsek, M., & Sluga, F. (2009). Monofilaments produced by blending virgin with recycled polypropylene. *Textile and Apparel*, *19*(3), 181–188.

InstaNANO. (2023). Percent Crystallinity Calculator form Differential Scanning Calorimetry (DSC) - InstaNANO. https://instanano.com/all/characterization/dsc/percent-crystallinity-2/

Johnston, I. (2017). How plastic is damaging planet Earth. https://www.independent.co.uk/environment/plastic-how-planet-earth-environment-oceans- wildlife-recycling-landfill-artificial-a7972226.html

Kayan, A., & Küçük, A. (2020). Plastik Kirliliğin Çevresel Zararları ve Çözüm Önerileri. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, *2*(22), 403–427.

Kolanjikombil, M. (2018). *The Substrates - Fibres, Yarn and Fabrics*. New Delhi, India: Woodhead Publishing India Pvt. Ltd.

Lord, P. R. (2003). *Handbook of yarn production*. *Handbook of yarn production*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited. https://doi.org/10.1533/9781855738652

Mankodi, H. R. (2011). Developments in hybrid yarns. In R. H. Gong (Ed.), *Specialist yarn and fabric structures* (pp. 21–55). Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited. https://doi.org/10.1533/9780857093936.21

McIntyre, J. E. (2005). *Synthetic fibres: nylon, polyester, acrylic, polyolefin*. *Synthetic fibres: nylon, polyester, acrylic, polyolefin*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited. https://doi.org/10.1533/9781845690427

Menges, G., Haberstroh, E., Michaeli, W., & Schmachtenberg, E. (2002). Werkstoffkunde Kunststoffe. München: C. Hanser Verlag.

Monofilament extrusion process. (2023). https://www.industrialextrusionmachinery.com/ocean-extrusion/monofilaments_plant/hdpe_monofilaments_plant.html

Morin, B., Adams, B., Follo, B., & Salem, D. (2009). Weight reduction and cost savings using hybrid composites containing high modulus polypropylene fiber. *COMPOSITES and POLYCON*, 15–17.

Netzsch GmbH. (2023). Crystallinity / Degree of Crystallinity. https://analyzing-testing.netzsch.com/en/training-know-how/glossary/crystallinity-degree-of-crystallinity

Özdemir, Ö., & Aydın, N. (2002). Ring iplik makinesinde core iplik eğrilmesi üzerine deneysel çalışmalar. *Tekstil ve Hazır Giyim Araştırma Dergisi*, *13*, 21–26.

Saydaş Plastik. (2022). Polietilen (PE) ve Geri Dönüşüm. Kasım 10, 2022, https://saydasplastik.com.tr/polietilen-pe-ve-geri-donusum/

Smith, B. C. (2021a). The Infrared Spectra of Polymers, Part I: Introduction. *Spectroscopy*, *36*(7), 17–22.

Smith, B. C. (2021b). The Infrared Spectra of Polymers II: Polyethylene. *Spectroscopy*, *36*(9), 24–29. https://doi.org/10.56530/spectroscopy.xp7081p7

Swicofil, A. (2023). Polyethylene monofilament yarns and fibers from Swicofil. https://old.swicofil.com/pe.html

Telli, A., Özdil, N., & Babaarslan, O. (2012). Usage of PET Bottle Wastes in Textile Industry and Contribution to Sustainability. *Journal of Textiles and Engineer*, *19*(86), 49–55. https://doi.org/10.7216/130075992012198607

Ugbolue, S. C. O. (2009). *Polyolefin Fibres: Industrial and medical applications*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited.

Uslu, O. (2019). *Bikomponent ve Karışım HDPE / LDPE Liflerinin Eriyikten Çekim Yöntemi ile Üretimi ve 3D Yazıcılarda Kullanımı*. Bursa Uludag University. Retrieved from http://hdl.handle.net/11452/11241

Üstündağ, S. (2014). Denim Kumaş Üretiminde Kullanılabilecek Yapıda Elastik Hibrit İpliklerin Geliştirilmesi, 89.