PİGMENT KATKILI TERMOKROMİK POLİESTER MULTİFİLAMENT İPLİK ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Eda ÇORAPÇI

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PİGMENT KATKILI TERMOKROMİK POLİESTER MULTİFİLAMENT İPLİK ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Eda ÇORAPÇI
0000-0003-1396-0900

Prof. Dr. Esra KARACA
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PİGMENT KATKILI TERMOKROMİK POLİESTER MULTİFİLAMENT İPLİK ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Eda ÇORAPÇI

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Esra KARACA

Termokromik malzemeler, farklı sıcaklıklara maruz kaldığında belirgin renk değişikliği gösteren boyar maddeler veya pigmentler olarak tanımlanmıştır. Günümüz tekstil endüstrisinde en çok ilgi çeken akıllı malzemelerden biri de termokromik malzemelerdir. Böylece, tekstil malzemelerinin hem görsel özelliklerinin zenginleştirilmesi hem de teknolojik özellikler bakımından fonksiyonellik kazandırılması amaçlanmaktadır. Sıcaklık karşısında renk değiştirme özelliği göstermesiyle, termokromik tekstil malzemeleri vücut termometresi olarak kullanılabilmektedir. Böylece termokromik tekstiller, spor esnasında kullanılan giysiler (yüzücü giysisi, kayak giysisi gibi), laboratuvar eldiveni, iş kıyafeti, ısı göstergeli kıyafet gibi kullanımlarda tercih edilmektedirler. Tekstil ürünlerine termokromik özellik, genellikle nihai kumaş yüzeyine boya, baskı gibi bitim işlemleriyle kromik esaslı pigmentin uygulanmasıyla kazandırılmaktadır. Ancak, bu şekilde elde edilen fonksiyonel özellikler genellikle kalıcı olmamaktadır.

Literatürde, sadece polietilen, poliamid ve polipropilen polimerleri kullanılarak iplik içerisine kromik pigment katkısının ilave edildiği çalışmalara rastlanmıştır. Tez çalışmasında; eriyik çekim yöntemiyle termoplastik poliester polimeri içerisine, termokromik pigmentler masterbatch %0,6, %1, %1,6 oranında eklenerek lif çekiminin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Elde edilen sonuçlarda, en az %1 oranında termokromik pigment katkılı poliester çorapların sıcaklık ile renk değiştirme özelliğine sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Poliester iplik, eriyikten çekim, termokromik, akıllı tekstiller, renk değiştiren tekstiller, kromik iplikler
2024, xiv + 91 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF PIGMENT ADDED THERMOCHROMIC POLYESTER MULTIFILAMENT YARN

Eda ÇORAPÇI

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

Supervisor: Prof. Dr. Esra KARACA

Thermochromic materials are dyes or pigments that exhibit a significant colour change in response to temperature variations. In the textile industry, thermochromic materials are considered one of the most fascinating smart materials. They enhance the visual appeal of textile materials while also providing technological functionality. Due to their ability to change colour in response to temperature, thermochromic textile materials can be used as body thermometers. Thermochromic textiles are commonly used in sports clothing (e.g. swimming and ski suits), laboratory gloves, and work clothes due to their ability to change colour with temperature. The thermochromic properties of textile products are typically achieved by applying chromic-based pigment to the final fabric surface through finishing processes such as dyeing and printing. However, these functional properties are often not permanent.

The literature only includes studies where chromic pigments were added to yarn using polyethylene, polyamide, and polypropylene polymers. The aim of this thesis study was to perform fibre drafting by adding thermochromic pigments to thermoplastic polyester polymer using the melt drafting method at rates of 0.6%, 1%, and 1.6% in masterbatch.

The study demonstrated that polyester socks containing a minimum of 1% thermochromic pigment possess the capability to alter their colour in response to temperature changes.

Key words: Polyester yarn, melt spinning, thermochromic, smart textiles, colour changing textiles, chromic yarns
2024, xiv + 91 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamda bana, tüm tecrübesi ile yol gösterip, araştırma ve deneysel çalışmalar sırasında bilgi birikimi ile desteğini esirgemeyen kıymetli hocam ve tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Esra KARACA ’ya teşekkürlerimi sunarım.

Üretim çalışmaları, test hizmetleri, masterbatch üretimi ve hammadde tedarikleri konusunda desteğini esirgemeyen, tüm teknolojik alt yapısını kullanma imkânı sunan SETAŞ KİMYA SANAYİ A.Ş firmasına teşekkürlerimi sunarım.

İplik üretim çalışmaları, test hizmetleri, hammadde tedarikleri süreçlerinde desteğini cömertçe sergilen bünyesinde çalışmış olduğum POLYTEKS TEKSTİL ARAŞTIRMA VE EĞİTİM A.Ş. firmasına teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmalarımda beni sonsuz destekleyerek, maddi/manevi her zaman yanımda olan yol arkadaşım, sevgili eşim Aydın ÇORAPÇI’ ya, sevgili kızım Pera ÇORAPÇI’ ya ve sevgili annem Zuhal ŞİMŞEK ‘e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eda ÇORAPÇI
18/01/2024

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iii
ABSTRACT	viii
TEŞEKKÜR	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Akıllı Tekstiller	3
2.1.1. Renk değiştiren tekstiller	5
2.2. Poliester Lifleri	13
2.2.1. Eriyik çekim yöntemi ile poliester filament üretimi	14
2.2.2. Poliester lif özellikleri	19
2.3. CIELAB Renk Uzayı	27
2.3.1. CIELAB - ΔE tolerans metodu	28
3. MATERYAL ve YÖNTEM	29
3.1. Materyal	29
3.1.1. Termokromik toz pigment ...	29
3.1.2. Poliester cipsi.....	30
3.1.3. Termokromik masterbatch....	30
3.2. Yöntem ...	31
3.2.1. Termokromik içerikli masterbatch üretimi	31
3.2.2. Poliester LOY iplik üretimi	32
3.2.3. Poliester FDY iplik üretimi	35
3.2.4. Poliester örme çorap üretimi	37
3.2.5. Uygulanan testler ve analizler	38
3.2.6. İstatistiksel analiz	50
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	51
4.1. Termokromik Toz Pigmente Uygulanan Test ve Analizlerin Sonuçları	51
4.2. Poliester Cipsine Uygulanan Test ve Analizlerin Sonuçları	54
4.3. Termokromik Katkılı Masterbatche Uygulanan Test ve Analizlerin Sonuçları	56
4.4. Poliester FDY İpliklere Uygulanan Test ve Analizlerin Sonuçları	58
4.5. Poliester Örme Çoraplara Uygulanan Testlerin Sonuçları	62
4.6. Poliester Örme Çorapların İstatistiksel Analiz Sonuçları	78
5. SONUÇ ...	82
KAYNAKLAR	84
ÖZGEÇMİŞ	91

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
°C	Santigrat derece
dl/g	Desilitre/gram
j/g	Joule/gram
mg	Miligram
rpm	Dakikadaki devir sayısı
mmol/kg	Milimol/kilogram
µm	Mikrometre
g/cm^3	Gram/santimetreküp
g/cm^2	Gram/santimetrekare
cN/dtex	Santinewton/desitex
%	Yüzde
ΔE	Toplam renk farkı
ΔL	Açıklık-koyuluk eksenindeki renk farkı
Δa	Kırmızılık-yeşillik eksenindeki renk farkı
Δb	Sarılık-mavilik eksenindeki renk farkı

Kısaltmalar	**Açıklama**
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
LOY	Düşük Çekimli İplik
EG	Etilen Glikol
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometresi
KÇ	Kaynama Çekme
KK	Kıvrım Elastikiyeti
KE	Kıvrım Kalıcılığı
EK	Kıvrım Kısalması
MOY	Orta Çekimli İplik
POY	Ön Çekimli İplik
CO	Pamuk
PAN	Poliakrilonitril
PA	Poliamid
PEN	Polietilennaftalat
PET	Polietilenteraftalat
PBT	Polibütilentreftalat
PES	Poliester
pH	Potansiyel Hidrojen
CTA	Selüloztriasetat
FDY	Tam Çekimli İplik
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TPA	Teraftalik Asit
TGA	Termogravimetrik Analiz
CIE	Uluslararası Aydınlatma Komitesi
CV	Varyasyon katsayısı
HOY	Yüksek Çekimli İplik
WO	Yün

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Şekil hafızalı tel içeren kumaşın, sıcaklık değişimine bağlı olarak zaman içerisinde şekil değişimi	4
Şekil 2.2.	Sıcaklık etkisi ile renk değiştiren kumaş	4
Şekil 2.3.	Tersine çevrilebilir renk kayması	6
Şekil 2.4.	Katı kristal fazı, sıvı kristal fazı ve izotropik sıvı fazı arasındaki geçişler	12
Şekil 2.5.	Poliester lifinin molekül yapısı	13
Şekil 2.6.	Polietilen teraftalat polimerinin oluşma reaksiyonları	14
Şekil 2.7.	Poliester lif üretimi akış şeması	15
Şekil 2.8.	Eriyik çekim yöntemi	18
Şekil 2.9.	Poliester liflerinin makromoleküler yapı yönlenmesi	20
Şekil 2.10.	Poliester lifindeki bağlar	21
Şekil 2.11.	Poliester lif üretiminde kullanılan düze delik şekilleri	22
Şekil 2.12.	Poliester liflerinin boncuklanma grafiği	23
Şekil 2.13.	CIELAB 1976 renk evren modeli	27
Şekil 3.1.	Termokromik toz pigment	29
Şekil 3.2.	Poliester cipsleri	30
Şekil 3.3.	Termokromik masterbatch	31
Şekil 3.4.	Berstorff ZE25A masterbatch üretim makinesi	32
Şekil 3.5.	Kumtel marka kurutma cihazı	33
Şekil 3.6.	Kurutma sonrasında termokromik masterbatchler	33
Şekil 3.7.	Dr. Collin Spin Lab filament üretim makinesi	34
Şekil 3.8.	Saurer Zinser 548-BT çekimli iplik makinesi ve makinedeki çekim ünitesi	36
Şekil 3.9.	Elha Harry Lucas örme makinesi	37
Şekil 3.10.	Poliester çorapların jarse örgü yapısı	37
Şekil 3.11.	Malvern Mastersizer 3000E partikül boyutu analiz cihazı	38
Şekil 3.12.	Hıtachi 7020 DSC cihazı	39
Şekil 3.13.	Santonet Sartorius MA 100 nem tayin cihazı	40
Şekil 3.14.	TA SDTQ600 TGA cihazı	40
Şekil 3.15.	Shimadzu IR Tracer -100 FTIR cihazı	41
Şekil 3.16.	Tescan Vega 3 SB taramalı elektron mikroskobu	41
Şekil 3.17.	Cressington Sputter Coater 108 Auto altın kaplama cihazı	42
Şekil 3.18.	Framo-Copmacta iplik çıkrığı	42
Şekil 3.19.	Mettler Toledo hassa terazi	43
Şekil 3.20.	Statimat ME+ kopma uzama ve mukavemet ölçüm cihazı	43
Şekil 3.21.	Oxford MQC+ yağ ölçüm cihazı	44
Şekil 3.22.	Texturmat ME kaynama çekme ölçüm cihazı	44
Şekil 3.23.	Evenness type C düzgünsüzlük ölçüm cihazı	45
Şekil 3.24.	Numune kumaş kesici gramaj aparatı	46
Şekil 3.25.	Hames H.Heal marka R&B cloth thickness tester cihazı	46
Şekil 3.26.	Heraeus etüv	47
Şekil 3.27.	Xrite spektrofotometre renk ölçüm cihazı	47
Şekil 3.28.	Multifibre kumaş ve SDL Atlas gri skala	49
Şekil 3.29.	Mesdan marka sürtme haslık cihazı	49

Şekil 4.1. Termokromik toz pigmente ait (%) hacimce miktar-parçacık boyutu grafiği 51
Şekil 4.2. Termokromik toz pigmentin DSC termogramı 52
Şekil 4.3. Termokromik toz pigmentin FTIR spektrumu 53
Şekil 4.4. Termokromik toz pigmentin TGA veri grafiği 53
Şekil 4.5. Poliester cipsin DSC termogramı 54
Şekil 4.6. Poliester cipsin FTIR spektrumu 55
Şekil 4.7. Poliester cipsin TGA veri garfiği 55
Şekil 4.8. Termokromik masterbatchin DSC termogramı 56
Şekil 4.9. Termokromik masterbatchin FTIR spektrumu 57
Şekil 4.10. Termokromik masterbatchin TGA veri grafiği 57
Şekil 4.11. Termokromik masterbatchin SEM görüntüsü 58
Şekil 4.12. F8 kodlu poliester ipliğin FTIR spektrumu 59
Şekil 4.13. F8 kodlu poliester ipliğin TGA veri grafiği 59
Şekil 4.14. F0 kodlu poliester ipliğin SEM görüntüsü 61
Şekil 4.15. F3 kodlu poliester ipliğin SEM görüntüsü 61
Şekil 4.16. F5 kodlu poliester ipliğin SEM görüntüsü 61
Şekil 4.17. F8 kodlu poliester ipliğin SEM görüntüsü 62
Şekil 4.18. J3 kodlu poliester örme çorapların renk farkı değerlerine sıcaklık ve zaman faktörlerinin etkisi 80
Şekil 4.19. J5 kodlu poliester örme çorapların renk farkı değerlerine sıcaklık ve zaman faktörlerinin etkisi 81
Şekil 4.20. J8 kodlu poliester örme çorapların renk farkı değerlerine sıcaklık ve zaman faktörlerinin etkisi 81

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	Kromik renklendirici sınıfları ve ilgili dış uyaran türleri	7
Çizelge 2.2.	Makromolekül düzene göre PET lifinin kristallik derecesi	20
Çizelge 2.3.	Modifiye poliester lifleirnin bazı mekanik özellikleri ve kullanım alanları	24
Çizelge 3.1.	Termokromik toz pigment özellikleri	30
Çizelge 3.2.	Poliester cips özellikleri	30
Çizelge 3.3.	Masterbatch makinesinin teknik özellikleri ve çalışma şartları	32
Çizelge 3.4.	Üretimi yapılan poliester LOY iplik kodları ve içerikleri	34
Çizelge 3.5.	Poliester LOY iplik üretim parametreleri	35
Çizelge 3.6.	Üretimi yapılan FDY iplik kodları ve özellikleri	36
Çizelge 3.7.	Poliester FDY iplik üretim parametreleri	36
Çizelge 3.8.	Üretimi yapılan örme kumaşların kodları ve özellikleri	38
Çizelge 3.9.	Renk ölçümü yapılan örme çoraplara uygulanan etüv şartları	48
Çizelge 4.1.	Termokromik toz pigmentin parçacık boyutu analiz sonucu	51
Çizelge 4.2.	Poliester FDY ipliklere uygulanan fiziksel test sonuçları	60
Çizelge 4.3.	Örme çorapların gramaj, kalınlık ve sıklık ölçüm sonuçları	62
Çizelge 4.4.	Katkılı ve katkısız örme çorapların 30°C sıcaklıkta bekletildikten sonraki spektrofotometre değerleri	64
Çizelge 4.5.	Katkılı ve katkısız örme çorapların 45°C sıcaklıkta bekletildikten sonraki spektrofotometre değerleri	65
Çizelge 4.6.	Katkılı ve katkısız örme çorapların 60°C sıcaklıkta bekletildikten sonraki spektrofotometre değerleri	66
Çizelge 4.7.	Katkılı ve katkısız örme çorapların 75°C sıcaklıkta bekletildikten sonraki spektrofotometre değerleri	67
Çizelge 4.8.	Katkılı ve katkısız örme çorapların 90°C sıcaklıkta bekletildikten sonraki spektrofotometre değerleri	68
Çizelge 4.9.	Katkılı ve katkısız örme çorapların 120°C sıcaklıkta bekletildikten sonraki spektrofotometre değerleri	69
Çizelge 4.10.	30°C sıcaklığa maruz bırakılan poliester örme çorapların fotoğrafları	72
Çizelge 4.11.	45°C sıcaklığa maruz bırakılan poliester örme çorapların fotoğrafları	73
Çizelge 4.12.	60°C sıcaklığa maruz bırakılan poliester örme çorapların fotoğrafları	74
Çizelge 4.13.	75°C sıcaklığa maruz bırakılan poliester örme çorapların fotoğrafları	75
Çizelge 4.14.	90°C sıcaklığa maruz bırakılan poliester örme çorapların fotoğrafları	76
Çizelge 4.15.	120°C sıcaklığa maruz bırakılan poliester örme çorapların fotoğrafları	77
Çizelge 4.16.	Poliester örme çorapların yıkama haslığı test sonuçları	78
Çizelge 4.17.	Poliester örme çorapların sürtme haslığı test sonuçları	78
Çizelge 4.18.	J3 kodlu poliester örme çorapların renk farkı değerlerinin varyans analizi ve SNK sonuçları	79

Çizelge 4.19. J5 kodlu poliester örme çorapların renk farkı değerlerinin varyans analizi ve SNK sonuçları..... 79
Çizelge 4.20. J8 kodlu poliester örme çorapların renk farkı değerlerinin varyans analizi ve SNK sonuçları..... 80

1. GİRİŞ

Tekstil malzemeleri; eşsiz fiziksel özellikleri (esneklik, hafiflik ve mukavemet vb.) ve çeşitli yöntemlerle (katkı ilavesi, yüzey modifikasyonu, nanoteknoloji uygulamaları vb.) belirli özelliklerin kazandırılabilmesi nedeniyle, disiplinli araştırmaların odak noktasındadır. Tekstil malzemelerinin özelliklerinin iyileştirilmesine, geliştirilmesine ve fonksiyonelleştirilmesine yönelik birçok başarılı çalışma örneği mevcuttur (Kirstein, 2013; Van den Kirboom ve Byluppala, 2011). Günümüzde hem akademik alanda hem de özel sektörde araştırma yapan akademisyenlerin ve araştırmacıların yoğun ilgisini toplayan konulardan biri de akıllı tekstillerdir (Coşkun, 2007). Akıllı tekstiller, geleneksel tekstil malzemelerinin özelliklerine sahip olmakla birlikte ilave fonksiyonel değer taşımaktadır (Kirstein, 2013; Van den Kirboom ve Byluppala, 2011). Multidisipliner yaklaşımla oluşturulan akıllı tekstil ürünlerinin dizaynı ve meydana getirilmesi; elektronik, yazılım, kimya, fizik vb. birçok alanın ortak çalışmasını gerektirmektedir. Akıllı tekstilleri oluşturan bu multidisipliner alt yapı, geleneksel yöntemlerle üretilen tekstil sektörüne farklı bakış açısı kazandırarak, yeni bir çalışma alanı sunmaktadır (Erol ve Çetiner, 2017).

Kromik malzemeler; dışarıdan gelen uyaranlar sonucunda renk yayan, renk değiştiren veya rengi yok olan materyallerdir. Bu çatı altında değerlendirilen akıllı tekstiller; pH değeri ile renk değiştiren iyonokromik (halokromik) malzemeler, basınç etkisi ile renk değiştiren piezokromik malzemeler, sıvı etkisiyle renk değiştiren solvatokromik malzemeler, ışık etkisiyle renk değiştiren fotokromik malzemeler, ısı etkisiyle renk değiştiren termokromik malzemeler şeklinde alt sınıflara ayrılır (Khattab, 2020).

Uyaran karşısında renk değiştiren (renk yayan veya rengi yok olan) materyallerin tekstil sektöründe en çok tercih edilenler; halokromik, fotokromik ve termokromik malzemelerdir (Mattilla, 2006). Halokromik malzemelerde renk değişikliğinin oluşması için bulunulan ortamda potansiyel hidrojen (pH) farkının gerçekleşmesi gerekmektedir. pH ile renk değiştirme özelliğine sahip tekstil ürünlerinde asidik veya bazik ortamda tersinir bir renk değişikliği görülmektedir (Schueren ve Clerck, 2010). Fotokromik özelliği taşıyan tekstiller, ışık etkisi ile renk değişikliği gözlemlenen malzemelerdir (Mattilla, 2006). Termokromik materyaller ise, bir veya birden fazla dış uyarana maruz

kaldığında belirgin renk değişimi sergileyebilmektedir. Ayrıca kromik materyallerin renk değişimi, kontrol edilebilmekte veya tersine çevrilebilmektedir (Khattab, 2020).

Tekstil ve hazır giyim sektörü hem ihracat hem de tekstil mamul üretiminde pazara öncülük etmektedir. Konvansiyonel tekstil sanayisi; lif üretimi, iplik üretimi, kumaş üretimi ve tekstil mamul üretimini kapsamaktadır. Pazarda, rekabetçi yaklaşımın önem kazanması, teknoloji gelişimi ve insanların ihtiyaçlarına yönelik çözümlere gereksinim duyulması tekstilin uygulama alanlarını hem büyütmekte hem de geliştirmektedir (Mecnika ve ark. 2014).

Ülkemizde yapılan ihracatın ve istihdamın büyük bir kısmını tekstil sektörü oluşturmaktadır. Akıllı materyaller, faklı disiplinler ile çalışılması sonucunda, akıllı tekstil ürünlerine dönüşerek yüksek katma değere sahip hale gelmektedir. Tekstil pazarında rekabet gücünü arttırma adımlarından birisi de katkı marjı yüksek ürünler üretmektir (Pakolpakçıl, 2020).

Tez çalışması kapsamında; termokromik tekstillerin ticarileşmesine yol açacak yenilikçi bir yaklaşım ile, katma değeri yüksek termokromik poliester ipliklerin üretilmesi hedeflenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Akıllı Tekstiller

Akıllı tekstiller, konvansiyonel tekstil malzemelerinin atmosfer koşullarına karşı koruma ve görsel özelliklerine ek olarak mekanik kuvvet, elektrik alanı, manyetik alan, basınç, ses ve yüksek ses frekanslı dalgalar, elektromanyetik radyasyon ve devinim gibi etkiyi veya etki değişikliğini algılama ve bu etkilere tepki verme niteliği olan tekstil ürünleridir (Tarakçıoğlu, 2002). Ayrıca uyaran, potansiyel hidrojen (pH), sıcaklık veya kimyasal bileşim gibi malzemenin bulunduğu ortam koşullarında bir değişkenlikten de oluşabilir (Rossi ve diğerleri, 2021).

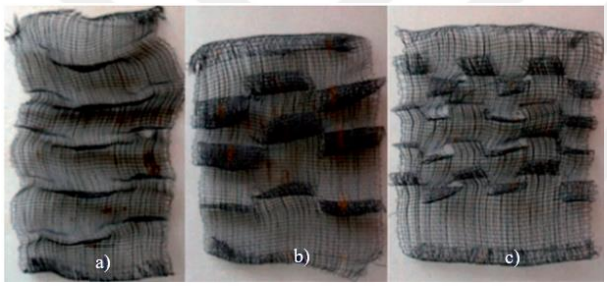
"Akıllı malzemeler" kavramı ilk olarak 1989 yılında Japonya'da ortaya atılmış olsa da hafızası olan ve uyaranlara tepki veren malzemelerin keşfi 1960'lara dayanmaktadır. Akıllı tekstil alanında yer alan ilk tekstil malzemesi, şekil hafızasına sahip ipek ipliğidir. 1960'larda şekil hafızalı malzemelerin ve 1970'lerde akıllı polimerik jellerin keşfi gerçek akıllı malzemelerin doğuşu olarak kabul edilmektedir. Akıllı malzemelerin tekstilde kullanılmaya başlanması 1990'ların sonlarına kadar gerçekleşmemiştir (Gao ve diğerleri 2021). Akıllı tekstiller, kullanıcıyla etkileşime girerek, geleneksel tekstillerin yapamadığı belirli işlevleri yerine getirebilen tekstil malzemeleridir. 'Akıllı' terimi, bu tekstillerin belirli bir dış uyaranı 'algılama', ardından bu uyarana tepki verme veya vermeme ve bazı durumlarda ölçülebilir, tekrarlanabilir, güvenilir ve genellikle tersine çevrilebilir bir şekilde çevresel koşullara uyum sağlama yeteneğini ifade eder (Oliveria ve diğerleri, 2021). "Akıllı tekstiller" terimi; en az bir akıllı bileşen içeren, lif, iplik veya kumaş halindeki tüm tekstil malzemeleri için kullanılmaktadır. Çevredeki değişkenleri algılayarak, bilgisayar ve insan arasındaki bağlantıyı sağlamak görevine sahip olan elektronik tekstiller ile ilgili ilk araştırma, 1990'ların sonunda yapılmıştır. İlk tekstil/elektronik yarı iletken bileşenler ise 20.yüzyılın sonlarında üretilmiştir (Koncar, 2016).

Akıllı tekstiller, neredeyse insan faaliyetlerinin her alanında uygulama bulmaktadır. Tıp, sağlık, elektronik gibi alanda faaliyet gösteren araştırmacılar akıllı tekstilleri keşfetmeye ve geliştirmeye çalışmaktadır. Akıllı tekstillerin diğer bir uygulama alanı ise otomotiv, inşaat, jeoteknik gibi mühendislik alanlarıdır. Yüksek işlevselliğinin yanı sıra bazı akıllı

tekstil ürünleri moda ve tasarım alanında büyük bir değere sahiptir (Mecnika ve diğerleri, 2014).

Akıllı tekstillerin birçok sınıflandırılması mevcuttur. Chapman 2006 yılında; akıllı tekstilleri, kullanılan malzemeler, etkili uyaranlar ve oluşan tepkileri baz alarak elektriksel, manyetik, optik, termal ve mekanik olmak üzere beş grupta toplamıştır (Chapman, 2006).

Fonksiyonel aktiviteye bağlı olarak akıllı giysiler; pasif, aktif ve ultra akıllı tekstiller olmak üzere üç farklı sınıfa ayrılabilir (Lee ve Someya, 2019; Min ve diğerleri, 2019). Pasif akıllı tekstiller**;** çevresel uyarıcılara karşı duyarlılık gösteren ve aldıkları etkiye bağlı olarak, bu uyarıcıları algılayıcı (sensör) işlevine sahip tekstillerdir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Şekil hafızalı tel içeren kumaşın, sıcaklık değişimine bağlı olarak zaman içerisinde şekil değişimi T =50°C: (a) 0 s; (b) 10 s; (c) 20 s (solda) (Stylios ve Wan, 2007 değiştirilerek alınmıştır)

Aktif akıllı tekstiller; harici bir uyarana bir sensör olarak veya merkezi bir kontrol ünitesinden elektrik akımı sağlayan bir aktüatör olarak yanıt verebilir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Sıcaklık etkisi ile renk değiştiren kumaş (Temel, 2017)

Ultra akıllı tekstiller; bir dış uyaranı algılayabilir, tepki verebilir ve ona uyum sağlayabilir (Schwarz ve diğerleri, 2010). Esas olarak bir beyin kontrol ünitesinden oluşur. Ultra akıllı tekstiller, iletişim teknolojisi, sensörler ve aktüatörler, malzeme ve biyolojik bilimler, yapay zeka, yapısal mekanik ve ileri işleme gibi bilim alanlarıyla birlikte uygulama bulabilmektedir (Gupta ve Edwards, 2019; Wu ve diğerleri, 2019).

2003 yılında Norstebo, akıllı tekstilleri üretim sırasındaki kullanılan malzemelere göre; şekil hafızalı materyallerden elde edilen akıllı tekstiller, faz değiştiren materyallerden elde edilen akıllı tekstiller, kromik materyallerden elde edilen akıllı tekstiller, elektronik/ iletken materyallerden elde edilen akıllı tekstiller ve son olarak diğer akıllı kumaşlar ve tekstiller olarak sınıflandırmıştır (Norstebo, 2003).

2008 yılında Kayacan, aktif akıllı malzemeleri; pasif akıllı yapılardan bir adım önde tutarak sensör yapılarının yanı sıra aktüatör adı verilen yapıları da içerdiğini ifade etmektedir. Aktüatörler, direkt olarak veya merkezi bir kontrol birimi tarafından algılanan sinyaller uyarınca görev yapan ve belirli mekanizmaları harekete geçirici etkiye sahip sistemler olarak tanımlanabilmektedir. Aktif akıllı tekstil yapılarına; şekil hafızasına sahip, bukalemunsu, su itici, buhar geçirgen, ısı depolayan ve ısı düzenleyen, buhar absorbe eden, ısı üreten kumaşlar veya elektrik ısıtmalı giysiler örnek verilebilir.

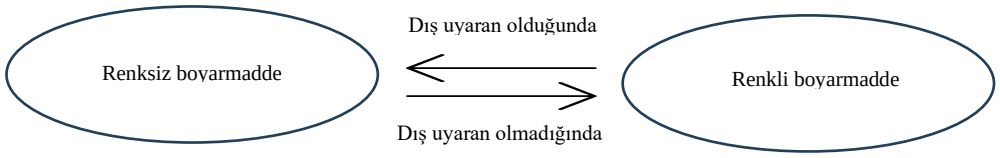
Akıllı lif, iplik ve kumaşların üretiminde birçok gelişmiş malzeme kullanılmaktadır. Bunlar arasında önem taşıyanlardan biri, hidrotermal sentez, mikrodalga reaksiyonu, miniemülsiyon polimerizasyonu, öğütme, piroliz, sonikasyon gibi farklı tekniklerle elde edilen nanoyapılardır (Yoshida ve diğerleri, 2018). Nanoyapılar (nanopartiküller, nanokristaller, nanoküreler, nanokapsüller, nanofiberler, nanotüpler, nanokıllar, vb.), polimerik matris katkıları olarak polimerizasyon sırasında kullanılabilmektedir.

2.1.1. Renk değiştiren tekstiller

Kromik malzemeler, dış uyaran indüksiyonuna bağlı olarak sınıflandırılabilmektedir. Fotokromik, termokromik, elektrokromik, piezokromik, solvatokromik ve kalsolkromik sırasıyla ışık, ısı, elektrik, basınç, sıvı ve elektron ışını gibi dış uyaranlarla renklerini değiştiren kromik malzemelerdir (Bouas-Laurent ve Dürr, 2001). Dış parametrelerin değişmesiyle tersine değişen optik özellikli akıllı malzemelerin geliştirmesi için önemli

çabalar sarf edilmektedir (Pérez ve diğerleri, 2018). Renk değiştiren malzemeler gelişmiş optik ürünler arasındadır (Garshasbi ve Santamouris, 2019). Kromik malzemeler, akıllı malzemelerin bir alt sınıf oluşturur ve rengi tersine dönüştürebilir bir özelliğe sahiptir (Ferrara ve Bengisu, 2014). İnorganik ve organik bileşikler, iletken polimerler ve farklı mekanizmalardan kaynaklanan özellikler içeren birçok madde kromiktir (Bozkurt, 2007). Bu olay maddelerin elektron yoğunluklarındaki (özellikle p ve d elektron seviyelerindeki) veya molekül yapısındaki değişimlere dayanmaktadır (Demir ve Gökçe, 2009).

Konvansiyonel tekstil boyarmaddelerinin ışığa, ısıya, yıkamaya, sürtünmeye ve terlemeye karşı yüksek kararlılığa sahip bir renk sunması beklenmektedir. Kumaşın yıkamaya, buruşmaya, sıcaklığa, ışığa, terlemeye maruz kaldığında rengindeki değişiklik, genellikle zayıf renk haslığı olarak bilinmektedir (Khattab ve diğerleri, 2017; Tang ve diğerleri 2019; Khattab ve diğerleri 2016). Bununla birlikte son dönemde; özellikle renk kayması tersine çevrilebilir ve kontrol edilebilir olduğunda, bir dış uyarana maruz kalındığında belirgin bir renk kayması özelliğine sahip olan kromik renklendiriciler için umut verici ticari niş uygulamalar olduğu fark edilmiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Tersine çevrilebilir renk kayması

Genel olarak kromik renklendiriciler; bir dış uyaran tarafından uyarılma nedeniyle bir rengi yayma, değiştirme veya kaybetme yeteneğine sahip malzemelerdir (Khattab ve diğerleri, 2019; Smet ve Vanneste, 2019). Farklı kromik malzeme sınıflarının listesi ve ilgili uyaranlar Çizelge 2.1 ‘de sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Kromik renklendirici sınıfları ve ilgili dış uyaran türleri (Khattab ve Abdelrahman, 2020)

Kromik renklendirici sınıfları	**Dış uyaran türü**
Fotokromik	Işık
Halokromik	pH
Termokromik	Sıcaklık
Elektrokromik	Elektrik akımı
Mekanokromik	Mekanik deformasyon
Piezokromik	Mekanik basınç
Tribokromik	Mekanik sürtünme
Solvatokromik	Solvent polaritesi
Higrokromik	Nem
Kemokromik	Kimyasal ajanlar
İyonokromik	İyon
Kronokrom	Zaman
Gazokromik	Gaz
Karsolkromik	Elektron demeti
Vapokromik	Organik madde buhar
Biyokromik	Biyolojik ajan
Agregakromik	Renklendiricinin agregasyonu
Kristalokromik	Renklendiricinin kristal yapı değişimi
Manyetokromik	Manyetik alan
Katodokromik	Elektron ışını ile ışınlama
Radyokromik	İyonlaştırıcı radyasyon

Fotokromik, halokromik, termokromik ve elektrokromik özellikler içeren kromik bileşikler en kapsamlı şekilde araştırılan akıllı renklendiriciler olmuştur. Listelenen diğer kromik bileşiklerin ticari kullanımı sınırlı olmakla birlikte, akademik alanda hala araştırılmaktadır (Cheng, 2019; Okino ve diğerleri, 2019).

Teknolojik ilerlemeler ve nüfus artışı; kullanıcıların, görevleri izlemesini ve yerine getirmesini kolaylaştıran malzemelere yönelik bir talep yaratmıştır. Son yıllarda

gelişmiş malzemelerin ortaya çıkışı, sürekli artan bilimsel çalışmaların bir sonucudur. Akıllı tekstiller, gerçekleştirebildikleri farklı işlevler nedeniyle devrim niteliğinde bir ürün kategorisi haline gelmiştir (Provin ve diğerleri, 2021).

Termokromizm, sıcaklıktaki değişimlere yanıt olarak rengin değiştiği bir olgudur. Renk değişiklikleri, malzemeler ısıtıldığında veya soğutulduğunda moleküllerin geçişine veya dönüşümüne dayanır. Malzemeler metal oksitler, polimerler, katı hal yarı iletkenleri ve löko-boyalar gibi farklı formlarda bulunabilir (Ferrara ve Bengisu, 2013; Jorgensen, 1984). Termokromik malzemeler, tersinir ve tersinmez malzemeler olarak sınıflandırılabilir. Tersinir termokromik malzemeler ısıtıldıklarında renk kayması gösterirler ve oda sıcaklığına kadar soğutulduklarında orijinal renklerine geri dönerler (Rajadurai ve diğerleri, 2020).

Bugün tekstil sektöründe kromik malzemelere yönelik uygulamaların çoğu moda, medikal, tasarım, teknik tekstil alanında, eğlence ve spor giysilerinde görülmektedir (Egeli, 2022).

Termokromik tekstiller: Sıcaklık farklılıkları nedeniyle faz geçişi sonunda renk değiştiren malzemelere termokromik malzemeler denir. Termokromik malzemelerin sıcaklık farklılıklarına tepkisi sonucunda, optik özellikleri tersine çevrilebilir (Cheng ve diğerleri, 2018; Hu ve Yu, 2020). Tersine çevrilebilir organik termokromik malzemelerin yapısı gereği, sabit bir sıcaklığın üzerine çıkıldığında, koyu tonlardan daha açık tonlara doğru renk geçişi gerçekleşir. Bu renk değişikliği; belirli bir moleküler yapıya sahip olan pigmentlerin, termal olarak tersine çevrilebilir bir dönüşümü ve görünür renkte spektral bir değişim üretmesi ile elde edilir. Kritik renk değiştirme sıcaklığının altına indiğinde, moleküler yapı termal olarak kararlı durumuna geri döner (Karlessi ve Santamouris, 2015).

Termokromik ürünlerin sıcaklığa karşı hassas tersinir mekanizması; sıvı kristal, organik ve inorganik tersinir olarak üç sınıfa ayrılabilir. Termokromik özelliğe sahip sistemdeki çözücüler, sıcaklığa karşı hassas materyallerin renk değiştirme sıcaklığını belirler. Sıcaklığa duyarlı sistemlerin renk değiştirme mekanizması, ekseriyetle farklı çözücülerin kullanılması ile değişiklik gösterir (Yan ve diğerleri, 2019). Ticarileşmiş, kapsülasyon yöntemiyle üretilen tersinir termokromik pigmentler; renk oluşturucu, renk

geliştirici ve çözücü olmak üzere üç bileşenden oluşur. Renk oluşturucu ve renk geliştirici arasındaki reaksiyonlar renkli duruma etki ederken, çözücü düşük sıcaklık için katı fazda olmalıdır. Sıcaklık arttıkça, çözücü sıvı faza geçer ve renk geliştirici-çözücü reaksiyonu üstün hale gelerek renksizleşmeye neden olur. Pigment bileşenlerini olumsuz şartlardan korumak için organik mikrokapsülleme yapılır (Pérez ve diğerleri, 2020). Son yıllarda, termokromik materyaller ve bu termokromik materyallerin polimerlere katılması sıklıkla incelenmiştir. Bu malzemeler, büyük gelişme kaydetmiş ve ilerleyen teknoloji ile çok daha önemli noktaya gelmiştir (Štaffová ve diğerleri, 2021).

Termokromik bileşiklerin kimyasal yapısı: Termokromik malzemeler, kimyasal yapısına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılır (Yılmaz, 2007; Bamfield, 2001).

1. Dolaylı tersinir termokromik bileşikler
2. İnorganik termokromik bileşikler
3. Organik termokromik bileşikler

Dolaylı termokromik tersinir bileşikler: Bu sistemler termokromik olmayıp renklendirici olarak değerlendirilir fakat sıcaklık farklılıkları sonucunda kromik özelliğe sahiptir. Bu nedenle, dolaylı termokromik tersinir bileşikler olarak adlandırılmaktadırlar (Leclerc, 1999; Ibrahim, 2012). Bu sınıfın yapısında, spirooksazin ve spiropiran bileşikleri bulunur. Bu bileşiklerin ışık etkisiyle renk değiştirme özellikleri baskın olsa da sıcaklık etkisiyle renk değiştirme özellikleri de bulunmaktadır. Bağ açılma-kapanma ilkesine göre kromik özellik göstermektedir. Tekstil sektöründe, bu sistemin kullanımı yaygın değildir (Bamfield, 2001; Ibrahim, 2012).

İnorganik termokromik bileşikler: İnorganik bileşikler çoğunlukla geçiş metallerini içerir. Bakır, kalay ve kobalt karışımları ile gümüş iyodür (AgI), civa iyodür (HgI), civa (II) iyodür (HgI_2) gibi bileşiklerdir. İnorganik termokromik maddeler; enjeksiyon kaplama ile polimer malzeme sentezinde, mürekkep veya boya üretiminde ve farklı olarak döküm yapımında kullanılabilir. Aşağıda inorganik termokromik bileşiklere ve sıcaklığa bağlı renk değişimlerine dair örnekler verilmektedir (Yılmaz, 2007; Bamfield, 2001; Burkinshaw ve ark., 1999; Aitken ve ark., 1996; Tilley, 2011; Yan ve ark., 2010).

- Çinko oksit (ZnO)'in rengi oda sıcaklığında beyaz renktedir. Yüksek sıcaklıklarda ise sarı renge dönüşür.
- Bakır civa iyodür (Cu_2HgI_4) 20°C sıcaklıkta kırmızı renkte iken 70°C sıcaklıkta siyah renktedir.
- Gümüş iyodür (AgI) katısı, 50°C sıcaklıkta sarı renkten turuncu renge dönüşür.

Yüksek sıcaklıklarda meydana gelen tersinir renk değişimlerinin ve genelde çözelti halinde oluşan renk değişiminin, tekstil pazarında inorganik termokromik bileşiklerin kullanımı sınırlıdır (Yılmaz, 2007; Sen, 2007; Aitken ve ark., 1996).

Organik termokromik bileşikler: Bu organik maddelerde sıcaklık, kromofordaki renk değişimine sebep olur. Sıcaklık kaynağı malzemeden uzaklaştırıldığında renk, kararlı durumuna geri döner. Tersinir termokromik özelliğe sahip sistemler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Yılmaz, 2007; Bamfield, 2001; Aitken ve ark., 1996; Kim ve ark., 2002; Christie ve Bryant, 1995; Di Nunzio ve ark., 2010; Waseem, 2012; Mather, 2001; Bamfield, 2002; Christie ve Bryant, 2005).

- Tautomerizm: Tautomerizm, tersinir tepkime sonucunda çift bağlı oksijenin hidroksi grubuna dönüşmesidir. Moleküllerin elektron konjugasyonunda artmaya veya azalmaya sebep olmaktadır, böylece farklı kromofor gruplar oluşabilmektedir.
- Stereoizomerizm: Stereoizomerizm ile sıcaklık etkisiyle renk değiştirme özelliğine sahip bileşikler; bir sıra aromatik halka ve oksijen/azot, en az bir etilen grubu gibi hetero-atom bulundururlar. Sıcaklık etkisiyle renk değiştirme, stereoizomerdeki varyasyonlar sonucunda oluşabilir fakat etkisi çoğunlukla 150°C sıcaklığın üzerinde görülmektedir. Bu sistemlerin, tekstil sektöründe kullanımı genellikle uygun değildir.
- Makromoleküler sistemler: Bu sistemlerin rengi, sıcaklık değişimi ile yavaşça değişir ve çoğu zaman tersinir bir değişimdir. Polimerin yapısı düşük sıcaklıkta düzlemseldir. Sıcaklık yükseldikçe düzenli olan yapının düzlemselliği kaybolur ve yüksek sıcaklıklarda makromoleküler sistemler meydana gelir.
- Supramoleküler sistemler: Bu supramoleküler sistemler, katı ve izotropik sıvı fazları arasındadır. Bu maddeler hem kristalin benzeri molekül yerleşimine hem

de sıvı gibi akış yeteneğine sahiptir. Bu sistemler sıvı kristaller olarak isimlendirilmektedir.

Termokromik boyaların kimyasal yapısı: Termokromik boyalar kimyasal yapısına göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılır (Meriç, 2016).

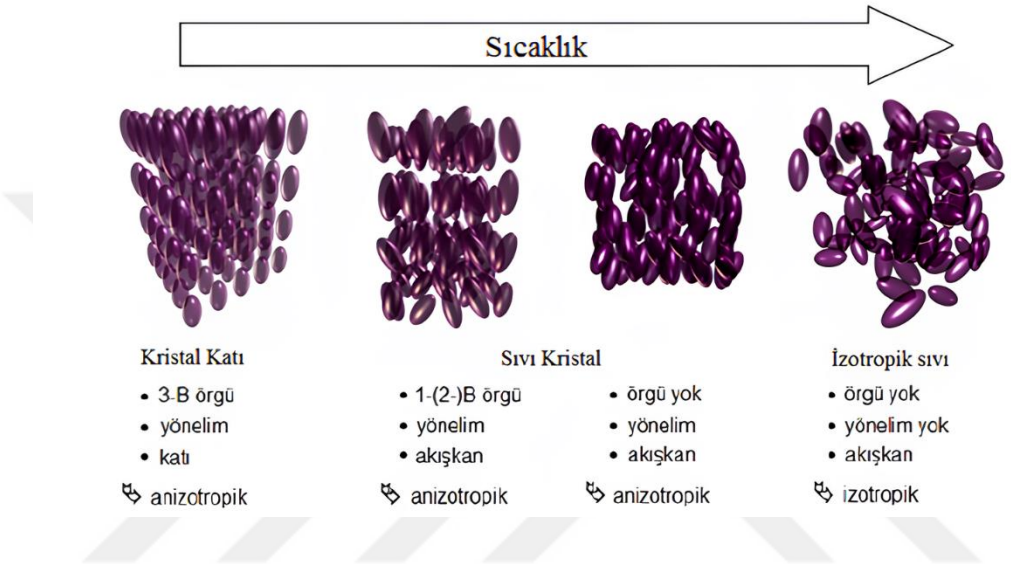
1. Leyko boyalar
2. Sıvı kristal boyalar

Leyko boyalar: Leyko tipi boyalar, endüstride en çok tercih edilen termokromik boyalardır. Leyko kelimesi, biri renksiz olan iki formu bulunan boyayı tanımlar (Christie, 2013). Leyko boyası, biri renksiz olan iki kimyasal yapı arasında geçiş yapabilen boyadır. Bu geçişler yükseltgenme (oksidasyon) veya indirgenme reaksiyonlarını kapsamaktadır (Meriç, 2016). Mikrokapsüllenmiş termokromik boya, üç maddenin etkileşimine dayanan renk oluşum sistemine sahiptir. Bileşenler; uçucu olmayan düşük erime sıcaklığına sahip hidrofobik çözücü, proton donörü ve organik renk oluşturucudur (Christie, 2013; Maleki, 2010).

Leyko esaslı termokromik boyalar, sıcaklık değişimlerine maruz bırakıldıklarında renk değiştiren mürekkeplerdir. Aktive edilme sıcaklıklarının altında renklidirler ve aktive edilme sıcaklıklarının üstünde pastel renkli veya renksizdirler. Leyko boya esaslı termokromik mürekkepler, -15°C ile 60°C aralığındaki sıcaklıklarda renk değiştirebilmektedir. Leyko boyalar; dokulu veya dokusuz yüzey üzerine binder ile aktarılır (Kooroshnia, 2013).

Sıvı kristal boyalar: Bu sistemin ilk uygulaması 55 yıl önceye dayanmaktadır. Sıcaklık etkisi ile renk değiştiren sıvı kristaller, öncelikle sıcaklık değişimlerini doğrudan insan cildine uygulayarak, sıcaklık değişimini farketmek için kullanılmıştır (Wang ve diğerleri, 2017). İkinci cins termokromik sistem; tekstil yüzeylerine uygulanabilen sıvı kristallere dayanmaktadır. Sıvı kristaller, çoğunlukla maddenin dördüncü hali olarak isimlendirilir, moleküller düzenli bir şekilde sıralanma eğilimi gösterirler ve sıvı benzeri davranış gösterirler. Leyko boya tipinin sağlamış olduğu termokromik etki ile sıvı kristaller tarafından sağlanan termokromik etki birbirinden farklı olabilmektedir. Bu durumda, bir dizi sıcaklıkta sürekli değişken renk spektrumu gözlenmektedir (Christie, 2013; Maleki, 2010). Termokromik özellikteki sıvı kristallerin renk değiştirme sistemi,

ışığın seçici yansıtılması ile sağlanmaktadır. Yansıtılan ışığın dalga boyu, moleküllerin helisel yerleşim mesafesine ve sıvı kristalin kırılma indeksine göre değişmektedir. Sıcaklığa bağlı olarak değişen moleküller arasındaki mesafe, sıcaklık farklılıklarına bağlı olarak yansıtılan ışığın dalga boyu da değişmekte, dolayısıyla oluşan renk farklılık göstermektedir (Akkuş, 2016). Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, katı kristal fazı, sıvı kristal fazı ve izotropik sıvı fazı arasında ayrı faz geçişleri vardır (Abdulkadir, 2012).



Şekil 2.4. Katı kristal fazı, sıvı kristal fazı ve izotropik sıvı fazı arasındaki geçişler (Abdulkadir, 2012)

Termokromik organik boya karışımları ve termokromik sıvı kristaller; renklendirme için kullanılan termokromik sıvı kristaller ve termokromik organik boya karışımları (leyko boyaları) doğrudan uygulanamaz. Her ikisi de mikrokapsülleme gerektirir. Mikrokapsülleme; küçük katı parçacıkların, sıvı damlacıkların veya gaz kabarcıklarının ince bir film, kaplama veya kabuk malzemesiyle kaplanması olarak tanımlanır. Parçacık boyutları genellikle 1 - 1000 mm arasındadır (White ve Leblanc, 1999).

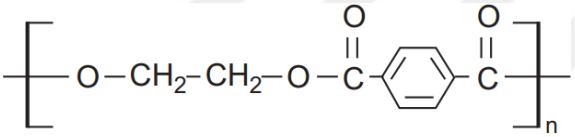
Tekstil sektöründe uygulanabilen termokromik mikrokapsüllerin ana problemi kapsüllenmiş sistemin, çözünmez veya su geçirmez olmasıdır. Termokromik bileşimlerin renk kuvveti genellikle çok düşüktür, çünkü nihai sistemde sadece az miktarda renklendirici bulunur. Tipik bir formülasyon kütle olarak sadece %2 renklendirici içerir. Sonuç olarak, termokromik boya kullanımı pastel tonlarla sınırlıdır. Tekstil uygulamasıyla ilişkili bir başka sorun ise birçok termokromik formülasyon ile

kumaşların boyanması sonucunda olumsuz haslık özelliklerine sahip kumaşlar olduğunu göstermektedir.

2.2. Poliester Lifleri

Federal Trade Commision tarafından poliester lifi, içinde ağırlık bazında en az %85 dihidrik alkol ve teraftalik asitten oluşan ester grubu içeren lif olarak tanımlanmıştır. En çok kullanılan poliester lifi Şekil 2.3'de monomer yapısı verilen lineer polietilen teraftalat (PET)'tır (J.R.Whinfield ve J.T.Dickson U.S. Pat. 2465319, 1949; Yıldırım, 2007; J.R.Whinfield ve J.T.Dickson, Brit. Pat. 578079, 1946).

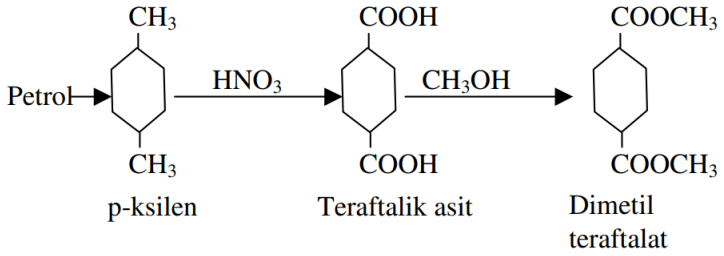
İlk olarak poliester lifleri, 1941 yılında R. Whinfield ve J.T Dickson tarafından, etilen glikol (EG) ve teraftalik asitin (TPA) polikondenzasyon reaksiyonu ile elde edilen polietilen tereftalat polimerinden üretilmiştir (Seventekin, 2003; Çirkin 2006; Çorapçı, 2023). Şekil 2.5'te poliester polimerinin molekül yapısı verilmiştir.

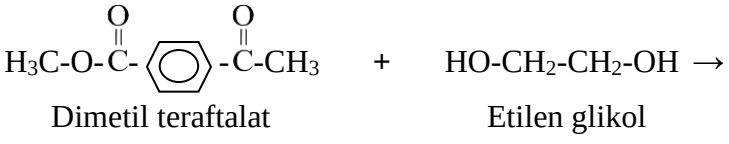


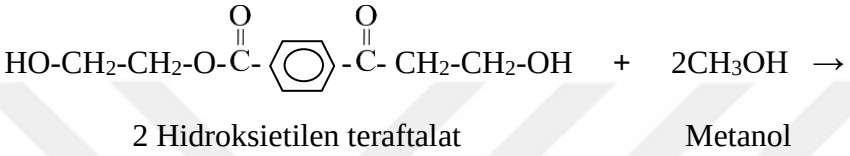
Şekil 2.5. Poliester lifinin molekül yapısı (Meredith, 1975; Gupta ve diğerleri, 2019)

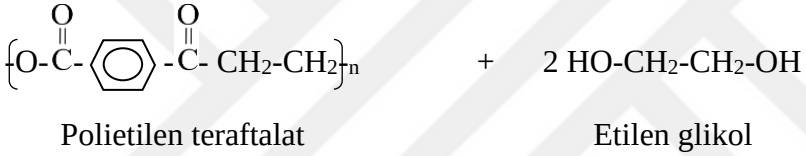
Birçok farklı poliester lifi üretilmiştir. Bunlar; PET, polipropilen teraftalat (PPT), politetrametilen teraftalat (PTMT), polibutilen teraftalat (PBT), polibismetilen siklohegzan teraftalat, polietilenoksibenzonat, polioksiasetil, polidioksan veya poli 2oksietoksiasetil, polipivalolakton, polietilen 1,2 difenoksietan ve polietilen naftalat (PEN)'tır (Lewin ve Pearce, 1983; Meredith, 1975; Yıldırım, 2007).

Ticari poliester lifi, dimetil teraftalat ile etilen glikolün polikondensazyon reaksiyonu neticesinde oluşan bir ürün olup, polimer monomerinin elde edilişi Şekil 2.6'da verilmiştir.









Şekil 2.6. Polietilen teraftalat polimerinin oluşma reaksiyonları (Cook, 1968; Yıldırım, 2007)

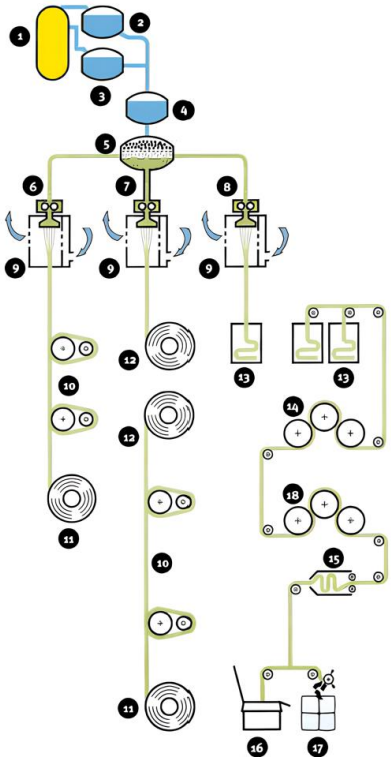
Poliester lif üretimi, transesterifikasyon reaksiyonu olarak bilinen dimetil teraftalat ile etilen glikolün 210°C'deki reaktörde reaksiyona girmesiyle başlar. Bu reaksiyon sonucu 2 hidroksietil teraftalat elde edilirken yan ürün olarak metanol oluşur. Metanol 210°C'de buharlaştığından ortamdan uzaklaşır. 2 hidroksietil teraftalatın 270°C'de ısıtılmasıyla polietilen teraftalat polimeri ve yan ürün olarak da etilen glikol elde edilir (Moncrieff, 1970; Yıldırım, 2007).

2.2.1. Eriyik çekim yöntemi ile poliester filament üretimi

Lif çekim işlemlerinin orijini, eski mısırlarda metal ipliklerin oluşturulması esnasında, harcın metal deliklerden geçirilerek elde edilmesine dayanmaktadır. Bireysel olarak metal ipliklerin temasından önce metaller soğutulmuştur. Kimyasal solüsyon ile üretimin prensipleri ise, ilk olarak Hilaire de Chardonnet tarafından 1889 yılında üretilen rayon liflerine dayanmaktadır (Akçam, 2011).

Poliester liflerinin çekimi ile ilgili bilgiler esas olarak 1930 yıllarındaki W.H.Carothers (Dupont) patentlerine ve dokümanlarına dayanmaktadır. Poliesterin lif oluşturma özellikleri ise ilk olarak 1941 yılında J.R.Whinfield ve J.T Dickson tarafından keşfedilmiştir. Whinfield ve Dickson patentleri, uzun yıllar poliester üretiminde yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak 1950'li yıllara kadar poliesterin ticari olarak kullanımı mümkün olmamıştır (Anonim 2004). İlk olarak poliester lifinin tanıtılması, Dacron ticari ismi ile Dupont firması tarafından 1951 yılında Amerika'da yapılmıştır. Bu yeni lifin kuru ve ıslak mukavemeti, ısı uygulaması sonrası göstermiş olduğu çok iyi boyutsal stabilitesi göze çarpan önemli özellikleri olmuştur (Militky, 2009; Jaffe ve diğerleri, 2020; Lin, 2008; Hardy, 1948; Akçam, 2011).

Tekstil liflerinde, 1939 yılı öncesinde selülozik liflere dayanan önemli bir endüstri şekillenmişken, 1939 yılı sonrasında ilk defa DuPont firmasının geliştirmiş olduğu eriyik çekim yöntemi (Şekil 2.7) ile naylon iplik üretimi gerçekleştirilmiştir. 1940'lı yılların başında ise eriyik çekim yöntemi ile poliester iplik üretilmiştir (Owen, 2011; Ural, 2012; Pakolpakçıl, 2013).



1. Ham petrol,
2. Dimetil teraftalat/ teraftalik asit (DMT/TPA),
3. Glikol,
4. PET,
5. Eriyik,
6. Poliester iplik üretimi-çekimli iplik (FDY),
7. Poliester iplik üretimi-çekimsiz iplik (POY),
8. Poliester iplik üretimi-TOW,
9. Filament oluşumu,
10. Çekim işlemi,
11. FDY bobini,
12. POY bobini,
13. TOW kovası,
14. Çekim işlemi,
15. Kıvırcıklaştırma,
16. TOW,
17. Kesim işlemi ve balyalama,
18. Fiksaj işlemi

Şekil 2.7. Poliester lif üretimi akış şeması (http://www.fibersource.com ; Yıldırım, 2007)

Eriyik çekim yöntemi alanındaki en önemli gelişme, 1970'lerdeki yaklaşık 1000 m/dk sarım hızlarından, 3000 m/dk ve üzeri yüksek sarım hızlarına geçilmesidir. 1975 yılına kadar, dünyadaki tekstüre ipliğin yarısından fazlası bu teknoloji kullanılarak üretilen ipliğe dayanıyordu. Eriyik çekim yöntemine dayalı lif üretimi için kullanılan tekniklerin kronolojisi aşağıdaki gibidir (Gupta ve ark., 1997).

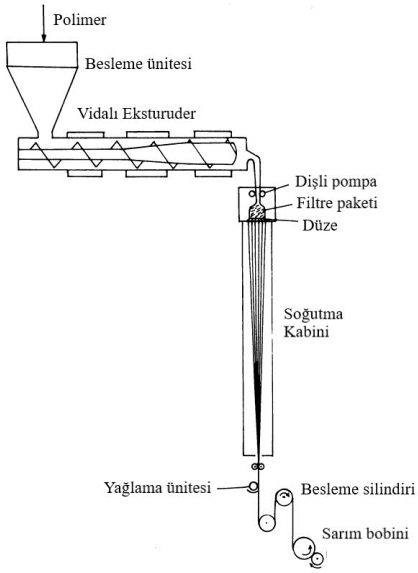
- Konvansiyonel proses: 600-1500 m/dk hızında eriyik çekim ile üretilen iplik daha sonra 400-1000 m/dk 'da genellikle 3 ila 4.5 arasında bir çekme oranında çekim işlemine tabi tutulur.
- Doğrudan eğirme-çekme prosesi: Eğirme ve çekmeyi tek bir kesintisiz işlemde birleştiren bu entegre proseste, nihai sarım hızları 6000 m/dk kadar yüksek olabilir, ancak sarım hızının 4000 m/dk 'yı aşması olası değildir.
- Yüksek hızlı eğirme prosesi: Kısmen yönlendirilmiş iplik elde etmek için sarım hızı 3000-4000 m/dk 'da olmalıdır, sıralı / eşzamanlı tekstüre işleminde 2'ye kadar çekim uygulanabilir.
- Süper yüksek hızlı eğirme prosesi: 4000 ila 6000 m/dk 'in üzerinde eğirme. 5500 m/dk 'de eğrilen filament için, daha hafif bir çekim uygulanmalıdır.

6000 m/dk kadar olan sarım hızları için genel isimlendirme yüksek hızlı eğirme ve sarım hızı 6000 m/dk 'nın üzerinde ise süper yüksek hızlı eğirme sistemini ifade etmektedir. (2), (3) ve (4) numaralı tekniklerin hepsinin yüksek hızlı eğirme prosesine dayalı olması dikkat çekmektedir (Gupta ve ark, 1997).

Günümüzde poliester üretimi için eriyik çekim yöntemi, kesikli ve sürekli olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır, Şekil 2.5'de poliester lif üretimi akış şeması gösterilmiştir. Kesikli yöntemle daha önce üretilmiş ve katı hale getirilmiş polimer (cips, tane veya granül), eriyik lif üretim tesislerinde, ekstrüder aracılığıyla eritilip basınçlandırılır. Tek bir ekstrüder yardımıyla, eşit uzunlukta dallanan borular aracılığı ile pek çok üretim birimine polimer beslenmektedir. Sonsuz vida yapısına sahip olan ekstrüderler katı polimerleri yüksek erime sıcaklıklarında homojen bir şekilde eritip basınçlandırma işlemi yaparlar. Bir ekstrüder aynı uzunlukta ve eşit mesafedeki birçok üretim birimine eriyik durumdaki polimeri besleyebilmektedir. Eriyik haldeki polimer, dağıtım boruları ile ilk olarak dozaj pompalarına iletilirler. Dozaj pompaları, belli basınç ve sabit debi ile polimeri özel filtre sistemlerinden geçirerek filament yapılarının oluştuğu düze

bloklarına iletirler (Rangkupan, 2002; Çorapçı, 2023). Filtrelerden çıkan polimer belli basınç altında düze plakasından geçirilir. Düze, üretilecek olan liflerin enine kesit şekillerinin belirlendiği ve eriyik haldeki polimerin kapalı sistemden çıktığı son bölgedir (Kozanoğlu, 2006). Düze içerisinden çıkan eriyik haldeki polimerde ilk çıkış çapı düze delik çapından biraz daha fazladır. Bunun nedeni, düze içerisinde oluşan viskoelastik gerilimin düze çıkışında ortadan kalkmasıdır. Düze bölgesinden çıkan polimer, sarım bölgesinin çekim işlemi uygulaması nedeni ile incelerek akışa devam eder. Düze çıkışında ortam sıcaklığı ve klimalardan sağlanan soğuk hava ile soğutma kabininde katılaşma işlemi ve kristalizasyon süreci başlamış olur (Rangkupan, 2002). Soğutma kabini çıkışında yağlama kılavuzlarında filamentler bir araya toplanarak, statik elektriklenmeyi önlemek amacıyla bitim yağı verilir. Daha sonra iplik formuna dönüşen lifler puntalama jetinden geçirilerek İplik kohezyonu, ipliğin işlenmesi sırasında filamentlerin bir bütün olarak davranmasını ve dağılmadan kullanım kolaylığını sağlamaktadır. Bitim yağı belli oranlarda su ile karıştırılarak kullanılmaktadır. Bu yapılan yağlama ve puntalama işlemleri, filamentlerin tekstüre işlemi sırasında performansının artmasını sağlamaktadır (Kozanoğlu, 2006; Çorapçı, 2023).

Sürekli yöntemde ise, önce kondenzasyon polimerizasyonu ile polimer üretimi yapılır ve hemen ardından eriyik haldeki polimer ile doğrudan lif üretimi gerçekleştirilir. Bu yöntemde polimer, lif üretiminden önce katılaştırılmaz. Eriyik haldeki polimerin kaynağı ne olursa olsun, polimer, oldukça hassas bir biçimde imal edilmiş dozaj pompaları tarafından sabit debide filtre ünitesinden geçirilerek, lif üretim birimine beslenir. Eriyik haldeki polimerin lif oluşturmak üzere düzeye ulaşmasından önce, bir dizi filtreden geçirilerek içerisinde var olabilecek her türlü parçacık, jel ve/veya yabancı maddelerin filtresi sağlanır. Bu safsızlıklar filtrelerde tutulmadan geçerlerse ya düze deliklerini tıkayacaklar ya da lifin içerisine yerleşip lif kesitinde yer işgal ederek lifin daha sonraki işlenme veya kullanımı esnasında performansını kötüleştireceklerdir. Matlaştırıcı veya renk verici parçacıklar filtrelerde tutulmamaktadır (Demir ve diğerleri, 2006; Akçam, 2011). Eriyik çekim yöntemi ile lif üretim tekniği Şekil 2.8'de şematik olarak gösterilmiştir ve günümüzde en çok kullanılan, basit uygulanabilen bir yöntemdir (Demir ve diğerleri, 2006).



Şekil 2.8. Eriyik çekim yöntemi (Gupta, 1997'den değiştirilerek alınmıştır)

Her ne kadar eğirme hızı üretimin artması anlamına gelse de, aynı zamanda lif yapısı ve özelliklerini de etkilemektedir. Eğirme hızı ranjlarına göre poliester lifi 5 gruba ayrılır (Yıldırım, 2007; Militky ve ark. 1991). Bunlar;

- Düşük oryante olmuş iplik (LOY): 1800 m/dk'lık eğirme hızında üretilen bu iplikler amorf yapıda olup, yarı kristalin formunu alması için ilave çekim işlemi uygulanmalıdır. Bu haliyle depolanması halinde kırılgan bir yapıya bürünür.
- Orta oryante olmuş iplik (MOY): 1800-2800 m/dk'lık eğrime hızında üretilen bu iplikler, yüksek moleküler oryantasyon içerirken, hala kristalin değillerdir. Bu ipliklere çekim ve tekstüre işlemi uygulandıktan sonra kullanılabilirler. Bu haliyle depolanması halinde kırılgan bir yapıya bürünür.
- Kısmi oryante olmuş iplik (POY): 2800-4200 m/dk'lık eğirme hızında üretilen bu iplikler, açık ve net bir şekilde kristalin olmasalar bile o kadar yüksek düzeyde bir moleküler oryantasyona sahiptirler ki, birkaç ay bozulmadan özelliklerini muhafaza ederler. Bu iplikler, eğirme işleminden sonra çekim veya tekstüre işlemine alınarak kullanıma sunulur. Genelde poliester POY'lar 3000-3500 m/dk'lık hızlarda üretilir.
- Yüksek oryante olmuş iplik (HOY): 4000-6000 m/dk'lık eğrime hızında üretilen bu iplikler, yüksek moleküler oryantasyona sahip kısmen kristalin ipliklerdir.

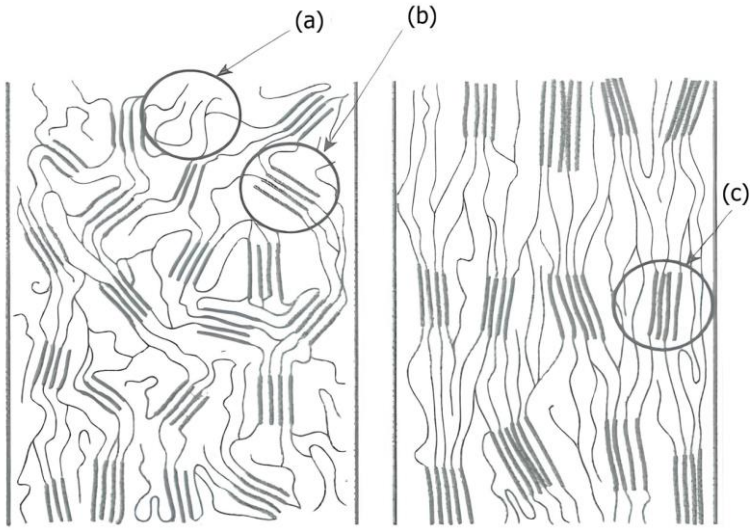
Bunlar tamamen çekilmiş iplikler olmadığından uzama oranı % 40-60 civarındadır.

- Tamamen oryante olmuş iplik (FOY): 6000 m/dk'dan daha yüksek hızlarda üretilen bu iplikler, her ne kadar % 20-30 civarında uzama oranına sahip olsalar da yüksek düzgünsüzlük içermelerinden dolayı sadece non woven üretiminde kullanılır.
- Tamamen çekilmiş iplik (FDY): FOY ipliğine verilen diğer bir isimlendirmedir. FOY'daki tanımlama sadece non woven üretimde kullanılırken, FDY ise dokuma veya örme kumaş üretiminde kullanılan sürekli iplik sınıfındadır.

Günümüzde lif üreticileri, lif çekim ünitelerinde farklı niteliklerde lifler üretmek için makinada değişimler yapmaktadırlar. Bu çeşitlendirme, özel kullanıcılar için farklı düze delik şekli yardımıyla farklı kesitlerde ve farklı kompozisyonlarda iplik elde edilerek sağlanmaktadır. Özel poliester lifleri, standart poliester liflerine göre daha yüksek fiyatla satılabilmektedir. Farklı kesitlerde lif üreterek sağlanan modifikasyon pahalı değildir ve modifikasyon işlemi üretim esnasında kolaylıkla sağlanabilmektedir. Lif üretim tesisleri de bu katma değeri yüksek ürünler ile kar oranlarını yükseltmek için; tüylü, mikro ve bakteriye, kokuya karşı dirençli lifler gibi lif üretimleri gerçekleştirerek katkı yapmaktadır (Anonim, 2004).

2.2.2. Poliester lif özellikleri

Morfolojik yapı özellikleri: Heuvel ve Husmen (1978) tarafından bildirildiğine göre; poliester lifleri yarı kristalin yapıda olup, üretim esnasında germe işlemi ile düzensiz yapılı amorf bölgedeki makromoleküller az ya da çok yönlenmiş bir yerleşim kazanmaktadır. Yönlenme miktarı, eriyik çekim esnasında uygulanan sarım hızı yükseldikçe artar. Makromoleküller yapı ve yönlenme durumuna göre öngörülen molekül düzenleri Şekil 2.9'da verilmektedir.



Şekil 2.9. Poliester liflerinin makromoleküler yapı yönlenmesi (a-amorf bölge, b-oryante olmamış kristalin bölge, c-kristalin bölge) (Kadolph, 2007; Akçam, 2011)

Prepelkin (2001) tarafından bildirilen; makromoleküler düzene göre PET lifinin kristallik derecesinin değişimi Çizelge 2.2'de verilmektedir.

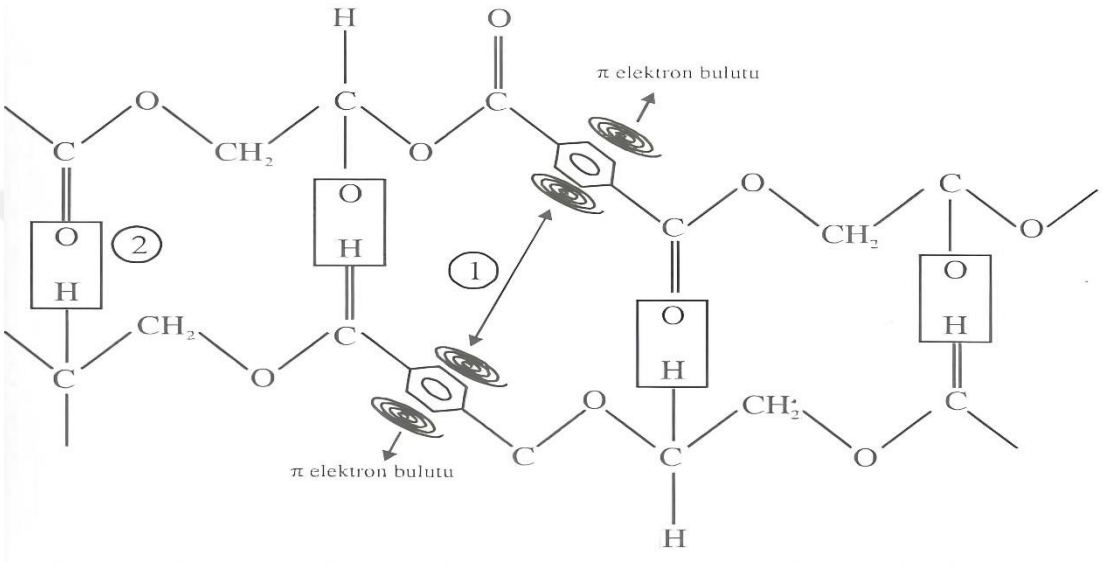
Çizelge 2.2. Makromolekül düzene göre PET lifinin kristallik derecesi (Şefkat 2005; Akçam, 2011)

Poliester yapı özelliği	**Kristalinite derecesi (%)**
Oryante olmamış amorf PET	2
Oryante olmamış kristalin PET	48
Oryante kristalin PET	65

Geller (2001) tarafından bildirildiğine göre; poliesterin yapı özellikleri ile ilgili halen çeşitli incelemeler yapılmaktadır. Dört yarı kristalin PET lifinin yapısı X-ışını difraksiyonu ve termal mekanik analiz yöntemiyle incelendiğinde, çoğunlukla fibriller (paralel yönlenmiş kristalin bölgelerin arasındaki amorf bölgeler) arasına yerleşmiş olan oryante orta bir fazın olduğu görülmüştür. Oysa geleneksel yapı modelleri iki fazlıdır. Bu inceleme yarı kristalin poliesterdeki kristalin olmayan kısmın tek bir yapı olarak ele alınamayacağını göstermektedir.

Tarakcıoğlu (1986) tarafından bildirildiğine göre; poliester liflerinde amorf bölgeler, anisotrop amorf bölgeler ve isotrop amorf bölgeler olarak ikiye ayrılarak incelenebilir.

Bu hipoteze göre; lifin boyarmadde alımını belirleyen kısım, yalnızca isotrop amorf bölgelerdir. Poliester lifleri düz moleküler zincirlere sahiptir ve bu moleküler zincirler çok iyi şekilde oryante olarak birbirine yakın şekilde paketlenmektedir. Oluşturulan bu paket yapısında moleküler zincirler arasında güçlü hidrojen bağlar oluşmaktadır. Poliester lifinin makromolekülleri arasındaki bağlar Şekil 2.10'da verilmektedir (Hockenberger 2004; Akçam, 2011).

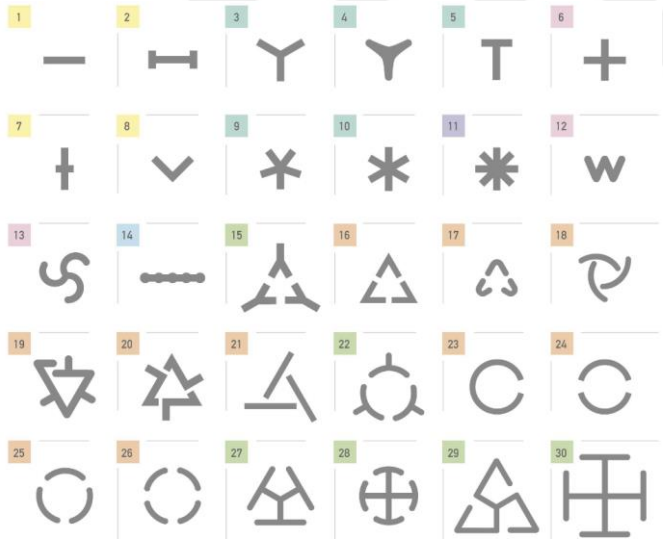


Şekil 2.10. Poliester lifindeki bağlar (Başer, 1998; Hockenberger, 2004)

Liflerde moleküllerin yönlenmesi ile daha düzenli bir yapı oluşacağından kristallenme derecesi artmaktadır. Düzenli bir yapı daha sıkı bir moleküler yerleşimi gerektireceğinden poliester liflerinde komşu moleküller arasında van der wall çekim kuvvetleri meydana gelmektedir. Moleküler zincir üzerinde karbon ve oksijen bağları yer almaktadır. Makromoleküler yapı içerisinde benzen halkalarından dolayı güçlü dispersiyon çekim kuvvetlerinin oluştuğu söylenebilir. Ayrıca ester gruplarının endüksiyon etkisi sonucu benzen halkalarında dipol momentleri ortaya çıkmaktadır. Benzen halkası ile konjuge durumda olan ve trans-trans konformasyonuna sahip ester yapısının yüksek polar nedeniyle polar çekim kuvvetleri görülmektedir (Karaca 2004; Akçam, 2011).

Ortalama polimerizasyon dereceleri, poliester cinsine ve üretim koşullarına göre farklılık göstermekle birlikte 100-350, molekül ağırlıkları ise 20,000-60,000 gr/mol değerleri arasında değişmektedir (Akçam, 2011).

Poliester liflerinin fiziksel özellikleri: Poliester lifleri yüksek veya normal dayanıklılıkta, parlak veya mat, beyaz veya eriyik boyama ile renkli olarak üretilebilmektedir. Üretilmiş olan bu lifler düşük boncuklanma ve yüksek kararlılık göstermektedir. Poliester lifleri, poliamid lifleri gibi saydam bir yapıya sahip değildir. Ağartma işlemine gerek olmamakla beraber, optik beyazlık istenen poliester lifleri için üretim esnasında lif çekim eriğine optik beyazlatıcı kimyasal madde eklenmek suretiyle optik beyazlık elde edilebilmektedir. Poliester liflerinin dairesel, trilobal, beşgen, yıldız, içi boş ve dörtgen enine kesitlerde üretilmesi mümkündür. Elde edildiği enine kesite göre poliester lifinin fiziksel özellikleri değişmektedir. Poliester lif üretiminde kullanılan düzeler Şekil 2.11'de verilmektedir.



Şekil 2.11. Poliester lif üretiminde kullanılan düze delik şekilleri (https://www.kasen.co.jp/english/product/spinneret/melt.php, 2023)

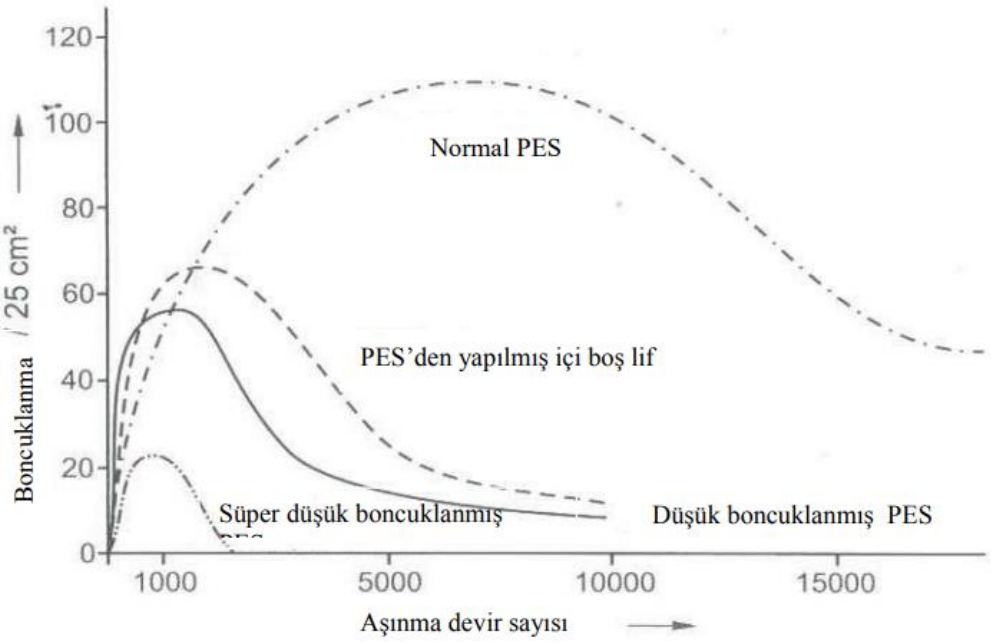
Çelik ve ark. (2000) tarafından bildirildiğine göre; poliester lifleri, bünyesinde fazla nem tutmayan hidrofobik özellikli liflerdir. Bunun sebebi, liflerin polar yapısı olması ve kristalin bölge oranının yüksekliğinden dolayı su moleküllerinin film tabakası şeklinde ancak lif yüzeyine tutunabilmesi ile açıklanmaktadır. Liflerin hidrofobik yapısı, statik

elektriklenmesinin yüksek olmasına ve havadaki yağlı kirleri çekmesine ve çabuk kirlenmesine neden olmaktadır.

Harmancıoğlu (1973) tarafından bildirildiğine göre; poliester liflerinin mikroskopta uzunlamasına görünüşü pürüzsüz bir çubuğa benzer. Enine kesiti ise, üretim esnasında kullanılan düze tipine bağlı olarak değişmektedir. Günümüzde yaygın olarak yuvarlak kesit kullanılmaktadır.

Poliester polimerinin viskozitesi ile erime sıcaklığının, iplik sarım hızının ve soğutma havası üfleme hızının artması lif oryantasyonunu artırmaktadır. Bu durum, poliester liflerinin mukavemetinin artmasını sağlamaktadır. Genellikle filamentlerin uzama oranı % 15-30 iken, kesikli liflerde bu oran % 30-50 arasında değişmektedir (Kadolph, 2007; Şefkat 2005; Akçam. 2011).

Poliester liflerinin aşınma dayanımı çok iyidir. Ancak mukavemetlerinden dolayı, lifler uzun süreli aşınma söz konusu olduğunda boncuklaşma eğilimi göstermektedir (Şekil 2.12). İpliğin yüzeyinde yer alan lifler koparak kumaş yüzeyinden dışarı çıkmaktadır. Lif uçları toz ve diğer lifleri üzerinde toplayarak küçük boncuklar oluşturmaktadır (Akçam, 2011).



Şekil 2.12. Poliester liflerinin boncuklanma grafiği (Albrecht ve ark. 2003)

Yüksek abrasyon dayanımlı poliester üretimi, sıcak çekimde kristalinitenin geliştirilmesi ve moleküler ağırlığın arttırılması ile sağlanır. Çizelge 2.3'te çeşitli poliester liflerinin bazı mekanik özellikleri ve son kullanım alanları verilmektedir.

Çizelge 2.3. Modifiye poliester liflerinin bazı mekanik özellikleri ve kullanım alanları (Kadolph 2007)

Lif çeşidi	Kopma mukavemeti (g/d)	Kopma uzaması (%)	Kullanım alanı
Yüksek mukavemetli filament	6,8-9,5	9-27	Kord bezi, endüstriyel kullanım
Normal mukavemetli filament	2,8-5,6	18-42	Giyim ve ev tekstili
Yüksek mukavemetli kesikli lif	5,8-7,0	24-28	Dayanıklı baskı malzemesi
Normal mukavemetli kesikli lif	2,4-5,5	40-45	Giyim ve ev tekstili

Poliester güneş ışığına karşı dayanıklıdır, fakat ultraviyole ışınlar belli süre sonra mukavemet kaybına sebep olmaktadır. Termoplastik özelliğinden dolayı ısıya maruz kaldığında eriyerek, isli bir yanma gerçekleşir. Kendine özgü aromatik kokusu vardır (Başer, 2002; Çorapçı 2023).

Poliester liflerinin yoğunluğu 1,38 g/cm³'dür. Katkı maddesi katılarak matlaştırılmış poliester liflerin yoğunluğu 1,40 g/cm³'dür. Yoğunluk, lif yapısındaki kristal bölgeler ile amorf bölgeler arasındaki oran ile belirlenmektedir. Lif üretim aşamasında sarım hızının artması ile moleküler düzen ve viskozite değişmektedir ve buna bağlı olarak yoğunlukta da değişme meydana gelmektedir. % 100 amorf poliester liflerinin yoğunluğu 1,34 g/cm³, % 100 kristalin poliester liflerinin yoğunluğu 1,46 g/cm³ iken, oryante olmuş yarı kristalin poliester liflerinin yoğunluğu 1,38-1,39 g/cm³ arasında değişmektedir (Akçam, 2011).

Poliester liflerinin nem emiciliği % 0,4 ila % 0,8 arasındadır. Zayıf nem emicilik özelliği konfeksiyon ürünlerinin ve döşemelik kumaşların konfor oranını düşürmektedir. Dokuma kumaşlar genellikle, dairesel kesitli poliester ipliklerden üretilmektedir. Ancak; dokuma kumaşlarda dairesel kesitli ipliklerin kullanılması sıcak ve nemli ortamlarda yeterli rahatlığı sağlamamaktadır. Sıcak ve nem ile oluşan sıvı, poliester liflerinin emiciliğinin düşük olmasından dolayı kumaş yapısından uzaklaştırılamamaktadır ve kumaş kaygan, yapışkan bir hal almaktadır. Poliester lifleri ile farklı emici lifleri harmanlayarak ve gramajı düşük kumaş tasarlayarak, poliester

liflerinden üretilmiş tekstil malzemelerinin konforunu arttırabilmek mümkündür. Uygulanabilecek bu yöntemlerden başka filament iplik yerine kumaş yapısında kesikli lif tercih edilebilir, dairesel kesit yerine trilobal kesit tercih edilebilir, bitim işlemleri ile emicilik sağlanabilir ve nem fitilleri oluşturulabilir (Kadolph, 2007; Gupta ve Edwards, 2019).

Pamuk ile poliesterin harmanlanması ile oluşan ipliklerden üretilen kumaşlar, nemli hava koşullarında, % 100 poliester kumaşlara göre daha iyi konfor sağlamaktadır. Nem, poliesterin dış yüzeyi boyunca yerleşmekte ve dış yüzeyden buharlaşmaktadır. Poliester kumaşlar hafiftir ve nem emiciliği olmadığından dolayı kolay kurumaktadır. Poliester liflerinin yapısında gözenek olmadığından ölçülü termal direnç göstermektedir. Soğuk havalarda, yün ve akrilik gibi ipliklerden üretilen kumaşların termal direnci ile poliester kumaşların termal direnç performansı farklılık göstermektedir (Akçam, 2011).

Poliester liflerinin düşük emicilik özelliğinden dolayı, sıcağa hassas diğer liflere göre statik elektriklenme daha çok görülmektedir. Poliester liflerinin statik elektriklenmesini düşürmek amacıyla lif çekim prosesinde su emilimini sağlayacak kimyasallar eriyiğe eklenmektedir. Bu maddelerin lif yapısına eklenmesi, lif çekim işleminin 1. aşamasında veya yağ iticilik işlemi için yapılan bitim işlemi aşamasında yapılmaktadır (Akçam, 2011).

Poliester liflerinin boyutsal stabilitesi yüksektir. Uygun bir şekilde ısıya maruz kaldığında boyutlarını korumaktadır. Poliester lifleri devamlı buruşuk veya pileli bir şekilde kalabilmektedir. Modifiye edilmemiş poliesterden yapılmış kumaşlarda boncuklanma çok ciddi bir problemdir. Düşük boncuklanma oranına sahip lifler ile harmanlanması boncuklanma problemini gidermede iyi sonuçlar vermektedir. Ayrıca, bitim işlemlerinde oluşan tüylerin yakılması boncuklanma oranını düşürmeye yardımcı olmaktadır (Akçam, 2011).

Poliester liflerinin kimyasal özellikleri: Poliester lifleri kuvvetli anorganik asitlere bile dayanıklı bir lif olmasına karşın, % 30‟u aşan konsantrasyon ve yüksek sıcaklıklarda asitler içinde tümüyle parçalanmaktadır. Asidin anyonu büyük ise (örneğin; sülfürik asit); lif içerisine nüfuz edemez, fakat yüzeyini etkileyebilmektedir. Asidin anyonu küçük ise (örneğin; hidroklorik asit ve nitrik asit), lif içine nüfuz ederek

daha hızlı ve daha fazla zarar. Poliester liflerinin zayıf asitlere karşı dayanıklılıkları iyidir. Bunlara sıcakta da dayanırlar. Kuvvetli asitlere ise; soğukta dayanıklıdırlar (Yakartepe 1995; Akçam, 2011).

Poliester makromoleküllerinde bulunan benzen halkalarından kaynaklanan dispersiyon çekim kuvvetleri ve H köprüleri nedeniyle sıkı moleküler üstü yapıya sahiptir. Poliester liflerinde bulunan bu bağ yapısı, alkalilere karşı dayanıksız ester bağlarına sahip olmasına rağmen, dayanıklılık göstermesini sağlamaktadır. Ancak bu dayanım derişik organik alkalilere karşı sınırlıdır. Kuvvetli alkaliler, poliester liflerini dıştan itibaren sabunlaştırarak parçalamaya başlar ve böylece lifler, ipeğimsi bir yapıya dönüşür (Yakartepe 1995; Seventekin, 2003).

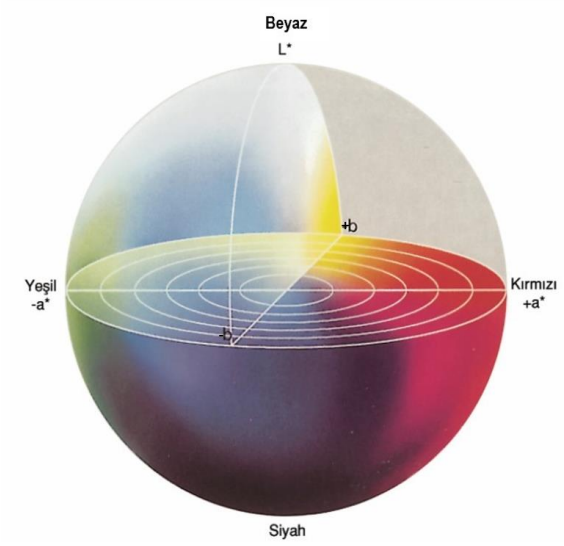
Poliester liflerinin düşük rutubet alımı nedeniyle elektrik iletkenliği düşüktür. Yüksek sıcaklıkta liflerin yumuşaması ve erimesi izolatör olarak kullanılmasını sınırlar, ancak düşük sıcaklıkta izole yeteneği iyidir. Güve ve zararlı böceklerden etkilenmez. Aynı zamanda küf ve mantar gibi mikroorganizmalardan da zarar görmez. Kaynar suda büzülme özelliği göstermesi yanında; aseton, kloroform, trikloretilen gibi birçok organik çözücülerden kaynama noktasında etkilenerek büzülürler (Altınok 2008).

Poliester liflerinin termal özellikleri: Poliester liflerinin camlaşma sıcaklığı 80-90°C arasındadır. Ancak termik, hidrotermik işlemler veya organik çözücülerle muamele sonucu anisotrop amorf bölge miktarı azalıp, kristalin bölge miktarı artan poliester liflerinin camlaşma sıcaklığı düşmektedir. Bu ilginç durum, bahsedilen etkenlerle lifte ard kristalizasyon meydana gelirken, anisotrop amorf bölgelerde bir gevşeme ve daha fazla boşluk, serbest hacim meydana gelmesi şeklinde açıklanmaktadır. Bu ard kristalizasyon sonucu camlaşma sıcaklığının düşmesinin yanında, lifin boyarmadde alım miktarı da artmaktadır. Poliester liflerinin yumuşama bölgesi 220-240°C sıcaklık aralığında iken, erime sıcaklıkları 265-267°C arasındadır (Akçam, 2011).

Poliester lifleri buharlı fikse işlemine tabi tutulduğunda mukavemetlerinde belli oranda düşüş gözlemlenir. Fikse sıcaklığı, 170-230°C arasında değişmektedir (Başer, 2002; Çorapçı, 2023).

2.3. CIELAB Renk Uzayı

Uluslararası Aydınlatma Komitesi CIE'nin görevi, boya, mürekkep gibi malzeme üreticileri için renk komünikasyon standartlarının tekrarlanabilir bir sistemini oluşturmaktır. Bunu, insan gözünü temel alarak oluşturduğu renk evren modelleri ile yapmaktadır. Renk eşleşmesi için evrensel bir şablon sağlamak bu standartların en önemli fonksiyonudur. Bu şablonun kaynağı ise standart gözlemci ve XYZ renk uzayı olarak belirlenmekle beraber, XYZ uzayının balanssız doğası, bu standartların kolayca elde edilmesini zorlaştırmıştır. L*a*b* renk modeli, dikey sarı-mavi ve yeşil-kırmızı eksenlerine dayanan dörtgensel koordinatlar kullanır. CIE, CIE L*a*b* ve CIE L*u*v* olarak adlandırılan daha muntazam renk ölçütleri geliştirmiştir. L*a*b* renk uzayının iyi dengelenmiş yapısı, bir rengin aynı zamanda hem yeşil hem kırmızı veya hem mavi hem sarı olamayacağı teorisine dayanmaktadır. Bunun sonucunda, kırmızı/yeşil ve sarı/mavi sıfatlarını tarif etmek için basit değerler kullanılabilir. CIE L*a*b*'da; L* açıklık/koyuluk (L*; 0:siyah, 100:beyaz), a* kırmızı/yeşil (a*; -60:yeşil, +60:kırmızı), b* sarı/mavi (b*; -60:mavi, +60:sarı) değerini gösterir (Şekil 2.13). Günümüzde en çok kullanılan ve renk yönetim sisteminde temel alınan renk evreni CIELAB 'dır (Erdoğan ve diğerleri, 2008).



Şekil 2.13. CIELAB 1976 renk evren modeli (Stefan ve diğerleri, 1999 değiştirilerek alınmıştır)

2.3.1. CIELAB - ΔE tolerans metodu

CIELAB hesaplamaları L*a*b* renk uzayına dayanır. CIELAB'ı kullanarak standart rengin yeri, ölçüm datasıyla, L*a*b* renk uzayında kesin olarak belirlenir. Daha sonra bu rengin etrafında teorik bir tolerans küresi çizilir. Bu küre standart renkle örnekler arasındaki kabul edilebilir değişiklik miktarını gösterir. Ölçüm verisi kürenin içinde kalan örnekler kabul edilebilirken, dışına düşen renkler kabul edilemez. Tolerans küresinin büyüklüğü, kabul edilebilir renk farklılığı ölçüsüyle belirlenir. ΔE; toplam renk farkını, ΔL; açıklık-koyuluk eksenindeki farkını, Δa; kırmızı-yeşil eksenindeki farkını, Δb; sarı-mavi eksenindeki farkını ifade etmektedir (ISO/CIE 11664-4:2019; Becerir, 2023). Reprodüksiyon endüstrisinde tipik bir müşteri toleransı genellikle 1 ve 6 ΔE arasındadır. Bu, tolerans kutusunun dışında olan örneklerin standarttan 6 ΔE birimden daha fazla uzakta olması anlamını taşır. 1 ΔE birimden az olan toleranslar genellikle mevcut metotlarla elde edilemez toleranslardır. 2-4 ΔE birime kadar uzaklığı olan örnekler genellikle çoğu gözlemci tarafından standart renkten ayırt edilemezler (Sharma, 2004).

Özcan (2008)'a göre; ΔE değeri ile renkler arasındaki uzaklık doğru orantılıdır. Renklerin arasındaki fark arttıkça ΔE değeri büyümektedir. ΔE değeri; 0 ise renk farkı yoktur, 1 ise çok küçük, 2 ise küçük, 3 ise orta, 4 ise büyük, 5 ise çok büyük renk farkı vardır anlamını taşımaktadır.

Agarwal ve ark. (2012)'e göre; iki renk arasındaki fark (ΔE) 5'in üzerinde olduğunda renklerin birbirinden ayırt edilebilir olduğu, 12'nin üzerinde olduğunda ise renklerin birbirinden tamamen farklı olduğu anlaşılmaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde; tez kapsamında kullanılan materyal, gerçekleştirilen üretimler, uygulanan testler ve değerlendirme yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

3.1. Materyal

Çalışmada; termokromik toz pigment, düşük sıcaklıkta eriyen kristalize edilmiş poliester cips, termokromik masterbatch olmak üzere 3 temel hammadde kullanılmıştır.

3.1.1. Termokromik toz pigment

Çalışmada kullanılan organik mikrokapsüllenmiş, akıllı tersinir termokromik toz pigment (Şekil 3.1) Ningo Precise New Material Technology Co. Ltd. firmasından Setaş firması aracılığıyla tedarik edilmiştir.



Şekil 3.1. Termokromik toz pigment

Termokromik toz pigment; mikrokapsüllü bir ürün olup, sıcaklık değişimine bağlı olarak farklı renkler gösterebilir. Termokromik toz pigmentin parçacık boyutu 1 – 10 µm arasındadır ve 33°C'nin altında koyu mavi renge sahip iken, 33°C'nin üzerinde rengi beyaza doğru değişmektedir. Termokromik toz pigmentin özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Termokromik toz pigment özellikleri

İçerik	Oran (%)
Melamin formaldehit reçine	1 - 5
3-(4-Dimetilamino-2-etoksifenil)-3-(1-etil - 2-metilindol-3-yl)-4-azaftalit	2 - 10
Metil stearat	40 - 80
1-Tetradecanol	5 - 10

3.1.2. Poliester cipsi

Çalışma kapsamında kullanılan düşük sıcaklıkta eriyen poliester cipsleri (Şekil 3.2) kristalize edilmiş süper parlak özellikte Sasa firmasından tedarik edilmiştir. Kullanılan poliester cipslerine ait özellikler Çizelge 3.2'de verilmektedir.



Şekil 3.2. Poliester cipsleri

Çizelge 3.2. Poliester cips özellikleri

Özellik		Değer
İntrinsik viskozitesi	*(dl/g)*	0,783 ± 0,017
Karboksil uç gruplar	*(mmol/kg)*	48 ± 8
Cips boyutu	*(g/100 cips)*	3,4
"b" renk	*(Hunter Lab XE)*	5 ± 1
"L" renk	*(Hunter Lab XE)*	86,5 ± 1,5
Erime sıcaklığı	*(°C)*	163,5 ± 3,5
Bağıl yoğunluk	*(g/cm^3) (20°C)*	1,55 ± 0,25

3.1.3. Termokromik masterbatch

Çalışmada kullanılan termokromik pigment içeren masterbatchler (Şekil 3.3) Setaş firmasında granül formda üretilmiştir.



Şekil 3.3. Termokromik masterbatch

Termokromik masterbatchler; %20 oranında termokromik toz pigmentlerden ve %80 oranında taşıyıcı görevine sahip poliesterden oluşmaktadır. Termokromik masterbatchlerin üretim yöntemi bölüm 3.2.1'de anlatılmaktadır.

3.2. Yöntem

Çalışma kapsamında termokromik toz pigment ve poliester cipsleri kullanılarak öncelikle pigment katkılı masterbatchler üretilmiştir. Ardından eriyik çekim ünitesinde masterbatchler dozajlanarak poliester LOY iplikler üretilmiştir. LOY iplikler, FDY formuna dönüştürülerek örme çorapların üretiminde kullanılmıştır. Gerçekleştirilen üretim çalışmalarının ve üretilen malzemelere uygulanan test ve analizlerin detayları aşağıda verilmektedir.

3.2.1. Termokromik içerikli masterbatch üretimi

SETAŞ firması tarafından Berstorff ZE25A makinasında (Şekil 3.4), %20 oranında termokromik toz pigment ve %80 oranında poliester polimeri içerecek şekilde termokromik özellikli masterbatch üretimi gerçekleştirilmiştir. Masterbatch makinasının teknik özellikleri ve çalışma şartları Çizelge 3.3'te verilmektedir.



Şekil 3.4. Berstorff ZE25A masterbatch üretim makinası

Çizelge 3.3. Masterbatch makinasının teknik özellikleri ve çalışma şartları

Özellik	**Değer**
Dış vida çapı *(mm)*	25
İç vida çapı *(mm)*	17
Merkez mesafesi *(mm)*	21,5
Vida boy/çap oranı	42
Vida hızı (minimum/maksimum) *(rpm)*	30/600
Mil başına tork (maksimum) *(Nm)*	90
Ekstruder sıcaklığı (maksimum) *(°C)*	400
Erime basıncı (maksimum) *(bar)*	300

3.2.2. Poliester LOY iplik üretimi

LOY iplik üretimine başlamadan önce; masterbatchler ve poliester cipsleri, KUMTEL markalı fırında (Şekil 3.5) 100°C'de yaklaşık 20 dakika kurutulmuştur.



Şekil 3.5. Kumtel marka kurutma cihazı

Kurutma sonrasında termokromik pigment katkılı masterbatchlerin iki farklı renge sahip görüntüsü Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Kurutma sonrasında termokromik masterbatchler

Masterbatch üretiminin ardından, SETAŞ firmasındaki Dr. Collin Spin Lab filament üretim hattında (Şekil 3.7) poliester LOY iplik üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada; katkısız, %3, %5 ve %8 dozajlama oranlarında termokromik masterbatch katkılı olacak şekilde 135 dtex 48 filamentli ve dairesel kesitli dört farklı LOY iplik elde edilmiştir. Elde edilen ipliklerin kodları ve içerikleri Çizelge 3.4 'de verilmektedir.



Şekil 3.7. Dr. Collin Spin Lab filament üretim makinesi

Çizelge 3.4. Üretimi yapılan poliester LOY iplik kodları ve içerikleri

LOY iplik kodu	**Termokromik masterbatchin dozajlama oranı (%)**	**İplikteki termokromik pigment katkı oranı (%)**
L0	-	0
L3	3	0,6
L5	5	1
L8	8	1,6

Tüm poliester LOY ipliklerin üretimlerinde, Çizelge 3.5'de verilen aynı parametrelerle çalışılmıştır.

Çizelge 3.5. Poliester LOY iplik üretim parametreleri

Parametre	Değer
Ekstrüder 1. bölge sıcaklığı *(°C)*	43
Ekstrüder 2. bölge sıcaklığı *(°C)*	225
Ekstrüder 3. bölge sıcaklığı *(°C)*	225
Ekstrüder 4. bölge sıcaklığı *(°C)*	230
Ekstrüder 5. bölge sıcaklığı *(°C)*	230
Ekstrüder 6. bölge sıcaklığı *(°C)*	230
Ekstrüder 7. bölge sıcaklığı *(°C)*	230
Ekstrüder 8. bölge sıcaklığı *(°C)*	230
Soğutma kabini sıcaklığı *(°C)*	22
1. godet hızı *(m/dk)*	312
2.godet hızı *(m/dk)*	658
3.godet hızı *(m/dk)*	790
4.godet hızı *(m/dk)*	798
1.godet sıcaklığı *(°C)*	110
2.godet sıcaklığı *(°C)*	98
3.godet sıcaklığı *(°C)*	90
4.godet sıcaklığı *(°C)*	51
1.godet ve 4.godet arasındaki çekim *(%)*	2,55
Sarım hızı *(m/dk)*	312

3.2.3. Poliester FDY iplik üretimi

Üretilen poliester LOY iplikler, Polyteks firmasındaki Saurer Zinser 548-2 BT çekimli iplik makinesinde (Şekil 3.8), iplikteki kristalin bölge oranını, dolayısıyla mekanik özelliklerini artırmak amacıyla 110 dtex 48 filamentli FDY iplik formuna dönüştürülmüştür.





Şekil 3.8. Saurer Zinser 548-2 BT çekimli iplik makinesi (solda) ve makinedeki çekim ünitesi (sağda)

Üretilen FDY iplik kodları ve özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir. Poliester FDY ipliklerin üretimi, Çizelge 3.7'de verilen aynı parametrelerle gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.6. Üretimi yapılan FDY iplik kodları ve özellikleri

İplik kodu	Termokromik iplikteki pigment katkı oranı (%)
F0	0
F3	0,6
F5	1
F8	1,6

Çizelge 3.7. Poliester FDY iplik üretim parametreleri

Parametre	Değer
Çekim oranı	1,2
Ön çekim	1,008
Godet sıcaklığı *(°C)*	60
Fırın sıcaklığı *(°C)*	80
Jet basıncı *(bar)*	0,8
Sarım çıkış hızı *(m/dk)*	0,975
Sarım açısı *(°)*	17,5
Sarım hızı *(m/dk)*	600

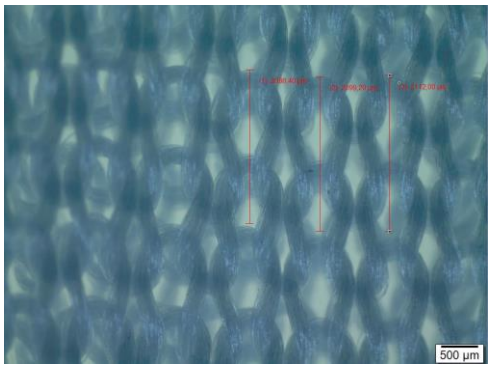
3.2.4. Poliester örme çorap üretimi

Poliester FDY ipliklerden, ELHA Harry Lucas markalı yuvarlak örme makinasında (Şekil 3.9), tüp formunda çoraplar üretilmiştir.



Şekil 3.9. Elha Harry Lucas örme makinası

Üretilen çorapların Olympus SZ61 mikroskobunda görüntülenen jarse (süprem) örgü yapısı Şekil 3.10'da verilmektedir.



Şekil 3.10. Poliester çorapların jarse örgü yapısı

Üretilen poliester örme kumaşların kodları ve yapısal özellikleri ise Çizelge 3.8'de verilmektedir.

Çizelge 3.8. Üretimi yapılan örme kumaşların kodları ve özellikleri

Kumaş kodu	Kullanılan iplik kodu	İplik içerisindeki termokromik pigment oranı
J0	F0	0
J3	F3	0,6
J5	F5	1,0
J8	F8	1,6

3.2.5. Uygulanan testler ve analizler

Partikül boyutu analizi: Termokromik toz pigmentin partikül boyutu dağılımları, Bursa Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda bulunan Malvern Mastersizer 3000 E cihazı (Şekil 3.11) kullanılarak tespit edilmiştir. Ölçümler, ISO 13320 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Test sonunda termokromik toz pigmentin partikül boyut dağılım grafiği alınmış ve numunedeki partiküllerin hacimsel dağılımının, sırasıyla %10, %50 ve %90'ının daha küçük boyutlarda olduğunu ifade eden D_{10}, D_{50} ve D_{90} değerleri tespit edilmiştir.



Şekil 3.11. Malvern Mastersizer 3000E partikül boyut analiz cihazı

Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) analizi: Termokromik toz pigmentin, düşük sıcaklıkta eriyen poliester cipsin ve termokromik masterbatchin, Polyteks firmasında bulunan HİTACHİ 7020 DSC cihazı (Şekil 3.12) kullanılarak, termal analizleri yapılmıştır.



Şekil 3.12. Hitachi 7020 DSC cihazı

DSC analizleri, ISO 11357-7 standardına göre, 30-300°C aralığında 10°C/dk ısıtma-soğutma hızında gerçekleştirilmiş ve ısı akışı-sıcaklık termogramları elde edilmiştir. Erime bölgesindeki alanı oluşturan enerji sadece kristalin bölgedeki moleküller arası bağın koparılması gereken enerjiyi vermektedir ki, bu alan ne kadar büyük olursa kristalin büyüklüğü ve oranı da o kadar büyük olacaktır. Analiz sonunda, malzemelerin kristalinite (%) değerleri Formül 3.1'e göre belirlenmiştir.

$$\text{Kristalinite (\%)} = (\Delta H_m - \Delta H_c) / \Delta H_m°*100 \quad (3.1)$$

Burada; ΔH_m: Erime enerjisi (j/g), ΔH_c: Soğuk kristalleşme enerjisi (j/g), ΔH_m: % 100 kristalin olan aynı polimerin erime enerjisi (j/g) 'dir.

%100 kristalin poliester polimerinin erime enerjisi 140,1 j/g'dır (Sichine, 2000; Mehta, 1978; Hegde, 2004).

Nem içeriği analizi: Termokromik masterbatchin ve düşük sıcaklıkta eriyen poliester cipsin nem miktarı tespiti, SETAŞ firmasındaki SARTONET Sartorius MA 100 nem tayin cihazında (Şekil 3.13) yapılmıştır. Öncelikle iplik üretiminde kullanılan düşük sıcaklıkta eriyen poliester cips, tek kullanımlık numune kabına yerleştirilmiştir. Hazırlanan numune kabı cihazın numune bölgesine konulmuştur. Cihazın poliester için tanımlanmış olan test parametreleri seçilerek analiz yapılmıştır. Test başlangıç sıcaklığı; 30°C, bitiş sıcaklığı; 110°C ve test süresi 15 dakika olarak ayarlanmıştır. Cihaz; sıcaklık artışına bağlı olarak buharlaşma sonucu kaybedilen ağırlığı ölçmektedir.



Şekil 3.13. Sartonet Sartorius MA 100 nem tayin cihazı

Termogravimetrik analizi (TGA): Termokromik toz pigmentin, düşük sıcaklıkta eriyen poliester cipsin, termokromik masterbatchin ve F8 kodlu (termokromik katkının %8 dozajlanarak üretildiği) ipliğin termogravimetrik analizi, Bursa Teknoloji Koordinasyon ve Arge Merkezi (BUTEKOM) Test ve Analiz Laboratuvarında bulunan TA marka SDTQ600 model cihaz (Şekil 3.14) ile yapılmıştır. Malzemenin ısıl kararlılığını belirlemek, hangi sıcaklıkta ağırlıkça değişim gösterdiğini tespit etmek için kullanılan bu test yöntemi TS EN ISO 11358-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. TGA test ölçüm parametreleri; 20°C ile 600°C arasında azot atmosferinde, 100 ml/dk gaz akış hızı, 20°C/dk ısıtma hızı; 600°C ile 900°C arasında oksijen atmosferi olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.14. TA SDTQ600 TGA cihazı

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometre (FTIR) analizi: Malzemelerin kimyasal bileşimini karakterize etmek için, BUTEKOM Test ve Analiz

Laboratuvarından bulunan SHIMADZU IR Tracer-100 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometresi (Şekil 3.15) ile analitik test yapılmıştır. FTIR analizi, malzemenin moleküler yapısında var olan kimyasal bağları ve fonksiyonel grupları tanımlamak için gerçekleştirilmiştir. Termokromik toz pigmente, düşük sıcaklıkta eriyen poliester cipse, termokromik masterbatche ve F8 kodlu (termokromik katkının %8 dozajlanarak üretildiği) ipliğe FTIR analizi yapılmıştır. FTIR ölçümleri 600 cm^{-1} ile 4000cm^{-1} dalgaboyu aralığında ve 4 cm^{-1} çözünürlükte gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.15. Shimadzu IR Tracer-100 FTIR cihazı

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi: Çalışma kapsamında kullanılan %20 termokromik pigment içeren masterbatch katkısının ve katkılı/katkısız poliester FDY ipliklerin taramalı elektron mikroskobu ile görüntü analizi yapılmıştır. SEM analizi, TÜBİTAK BUTAL test ve analiz laboratuvarında bulunan TESCAN Vega3 SB Taramalı Elektron Mikroskobu (Şekil 3.16) kullanılarak yapılmıştır. SEM cihazı, vakum ortamındaki numunenin yüzey topografisi ve kompozisyonu hakkında bilgi vermektedir.



Şekil 3.16. Tescan Vega 3 SB taramalı elektron mikroskobu

Taramalı elektron mikroskobunda malzemelerin görüntüsü alınmadan önce numunelerin iletken olması ve görüntü netliğinin yüksek olması için, yüzeylerine altın kaplama

yapılmıştır. Kaplama işlemi, Cressington Sputter Coater 108 Auto cihazında (Şekil 3.17) yaklaşık 50 saniye sürede 3,0 ± 0,5 nm kalınlıkta olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.17. Cressington Sputter Coater 108 Auto altın kaplama cihazı

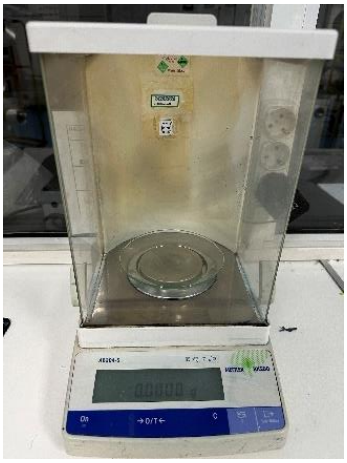
Fiziksel testler: Üretilen katkılı ve katkısız poliester FDY ipliklerine, Polyteks Tekstil Sanayi Araştırma A.Ş laboratuvarlarında standart atmosfer koşullarında kondüsyonlama sonrasında; numara, kopma uzaması, kopma mukavemeti, yağ miktarı ve kaynama çekme ve düzgünsüzlük testleri yapılmıştır. Ayrıca, poliester örme kumaşların gramajları tayin edilmiştir.

İplik numarasını hesaplamak için; çevresi 1 metre uzunluğunda olan Framo-Compacta marka çıkrığa (Şekil 3.18), ölçümü yapılacak olan iplikler gerilim kılavuzlarından geçirilerek DIN EN ISO 2060 standardına uygun 100 tur olacak şekilde sarılmıştır.



Şekil 3.18. Framo-Compacta iplik çıkrığı

Çıkrığa 100 m sarılan ipliklerin ağırlık ölçümleri, Mettler Toledo markalı hassas terazide (Şekil 3.19) üç tekrarlı olacak şekilde yapılmıştır.



Şekil 3.19. Mettler Toledo hassas terazi

Poliester FDY iplik numunelerinin kopma uzamaları ve kopma mukavemet ölçümleri Statimat ME+ cihazında (Şekil 3.20) DIN EN ISO 2062 standardına göre yapılmıştır. Yapılan test esnasında; FDY iplileri için çeneler arası mesafe 500 mm, çene hızı 500mm/dk ve her ikisinde başlangıç gerilimi 0,05 g/dtex olarak belirlenmiştir. Test, her ipliğe üç kez uygulanmıştır.



Şekil 3.20. Statimat ME+ kopma uzama ve mukavemet ölçüm cihazı

Poliester FDY iplik üretimi esnasında ve daha sonraki proseslerde oluşabilecek statik elektriklenme ve kopuşları önlemek amacı ile üretim esnasında verilen yağ miktarı, Oxford MQC+ cihazında (Şekil 3.21) tayin edilmiştir. Ölçüm için kullanılan test tüpleri başlangıçta, 40°C ‘de etüv içinde bekletilmiştir. Etüvden alınan tüpün içine analizi

yapılacak olan FDY iplikleri teflon parça ve sopa yardımıyla yerleştirilip daha sonra cihazın ortasında bulunan 40°C sıcaklıktaki hazneye konulmuştur. Bilgisayardan yağ cinsine göre program seçilip % yağ miktarı ölçülmüştür. Her numune için üç tekrar yapılmıştır.



Şekil 3.21. Oxford MQC+ yağ ölçüm cihazı

Poliester FDY ipliklerin kaynama çekme ölçümleri, DIN EN 14621 standardına göre Texturmat ME cihazında (Şekil 3.22) yapılmıştır.



Şekil 3.22. Texturmat ME kaynama çekme ölçüm cihazı

Cihazın test ölçüm süresi 30 saniye ve test hızı 800 m/dk olacak şekilde ayarlanmıştır. Ölçümü yapılacak iplikler çile şeklinde magazin aparatına yerleştirilmiştir. Her numune için 2 cN/tex ağırlık asılarak başlangıç değeri (L_0) ölçülmüştür. Daha sonra iplikler, etüvde 190°C de 5 dakika bekletilmiştir. Devamında etüvden çıkarılan ipliklere başlangıçta uygulanan 2 cN/tex ağırlık tekrar uygulanarak final boyları (L_g)

ölçülmüştür. Kaynama çekme değeri Formül 3.2'ye göre hesaplanmıştır. Testler, üç tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir.

$$\text{Kaynama çekme (\%)} = [(L_0 - L_g) / L_0] \times 100 \quad (3.2)$$

Poliester FDY ipliklere uygulanan düzgünsüzlük ölçümleri, DIN 53817-1 standardına göre, Evenness type C cihazında (Şekil 3.23) yapılmıştır. İplik düzgünsüzlüğü (%U); ipliğin kütle değişim katsayısı ($\%CV_m$) olarak adlandırılmaktadır. Cihazın çalışma parametreleri; iplik hızı 50 m/dk, ölçüm süresi 1 dakika, iplik geçirgenliği 50 cN ve ölçüm aralığı ± %12,5 olarak tanımlanmıştır. 50 metre uzunluğundaki ipliğin kalınlığındaki değişimler ölçülerek, ortalama düzgünsüzlük değeri (%U) tespit edilmiştir. Yapılan düzgünsüzlük testi; her numune için üç kez tekrar edilmiştir.



Şekil 3.23. Evenness Type C düzgünsüzlük ölçüm cihazı

Çalışma kapsamında üretilen poliester örme çorapların kumaş gramajlarının tespiti için Polyteks laboratuvarında bulunan numune kesici gramaj aparatı (Şekil 3.24) ve hassas terazi kullanılmıştır.



Şekil 3.24. Numune kumaş kesici gramaj aparatı

Gramaj aparatı ile, 100 cm^2 dairesel şekilde kumaş kesimi yapılmıştır. Örme kumaşlar hassas terazide tartılarak g/m^2 biriminde hesaplanmıştır. Kumaş gramaj ölçümü, üç tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir.

Katkılı ve katkısız örme çorap numunelerinin kumaş kalınlık ölçümleri; Bursa Uludağ Üniversitesi Tekstil Mühendisliği laboratuvarında bulunan, James H. Heal marka R&B Cloth Thickness Tester (Şekil 3.25) cihazında yapılmıştır. Kumaş kalınlığı; 5 g/cm^2 kuvvet altında ölçülmüştür. Test ölçümü 3 kez tekrarlanmıştır.



Şekil 3.25. James H. Heal marka R&B Cloth Thickness Tester cihazı

Örme çorapların sıklıkları; çubuk ve sıra sıklığı olmak üzere iki yönde tespit edilmektedir. Sıra sıklığı; 1 cm'deki ilmek satırları sayılarak tespit edilirken, çubuk sıklığı; 1 cm'deki çubuklar sayılarak tespit edilmektedir. Çubuk ve sıra sıklığının tespiti

için lup kullanılmıştır. Ölçümler kumaşın farklı bölgelerinden 3'er kez sayılarak tespit edilmiştir.

Spektrofotometrik renk ölçümleri: Çalışma kapsamında üretilen poliester örme çorapların, içerdiği termokromik pigment sayesinde, ısı etkisiyle renk değişimini analiz edebilmek için Heraeus marka etüv (Şekil 3.26) kullanılmıştır.



Şekil 3.26. Heraeus etüv

Test, farklı sıcaklık ve sürelerde gerçekleştirilmiştir. Etüvde sıcaklığa maruz bırakmadan önce ve sıcaklığa maruz bıraktıktan sonra renk farkını ölçmek için Xrite Spektrofotometre Renk Ölçüm Cihazı (Şekil 3.27) kullanılmıştır.



Şekil 3.27. Xrite spektrofotometre renk ölçüm cihazı

Test esnasında uygulanan parametreler Çizelge 3.9'da verilmektedir. 4 farklı örme çorap numunesine (katkısız ve üç farklı oranda termokromik pigment katkılı) 6 farklı (30 - 120 °C arasındaki) sıcaklıkta ve 3 farklı sürede (1 – 3 – 5 dakika) olmak üzere, toplam 72 adet renk ölçümü gerçekleştirilmiştir. Her bir numune ve parametre için renk ölçümü 10 kez tekrarlanmıştır.

Çizelge 3.9. Renk ölçümü yapılan örme çoraplara uygulanan etüv şartları

Uygulanan sıcaklıklar *(°C)*	30, 45, 60, 75, 90, 120
Uygulanan süreler *(dakika)*	1, 3, 5

Termokromik katkılı ve katkısız poliester örme çoraplar etüvde belirli sıcaklık ve sürede bekletilmeden önce laboratuvar şartlarında kondisyonlanmış ve kondisyonlanan örme çorapların spektrofotometre ile başlangıç renk değerleri ölçülmüştür. Bu ölçülen değerler referans değerler olarak kaydedilmiştir. Etüvde ısıl işleme tabi tutulan kumaşların spektrofotometre ile tekrar renk değerlerinin ölçümü yapılmıştır. Bu iki ölçüm arasında renk değerinin farkı (ΔE) hesaplanmıştır. Tekrarlı ölçümlerin yapılabilmesi için etüvden çıkartılan her numune kumaş, 15 dakika boyunca laboratuvar şartlarında bekletilmiş ve etüve yerleştirilerek tekrarlı ölçümler için sıcaklığa tabii tutulmuştur.

Renk farkı (ΔE) değeri Formül 3.2'deki gibi hesaplanmıştır (Roy, 2000)

$$\Delta E = [(\Delta a^*)^2+(\Delta b^*)^2+(\Delta L^*)^2]^{1/2} \quad (3.2.)$$

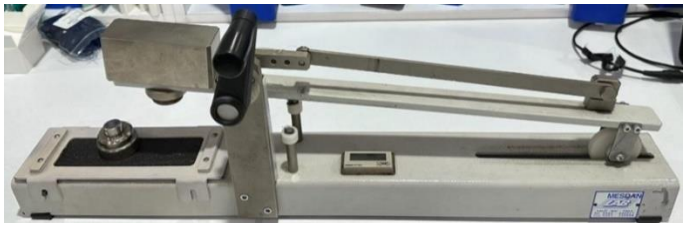
Burada; ΔL: açıklık-koyuluk farkı, Δa: kırmızılık ve yeşillik farkı, Δb: sarılık ve mavilik farkıdır.

Yıkama haslığı testi: Yıkama haslığı testi Sintaş Büküm Boya Tesktil A.Ş. firmasında, UNI EN ISO 105 C06 B2S standardına uygun gerçekleştirilmiştir. Katkılı örme çorap numuneleri 40 mmx100 mm boyutuna sahip olacak şekilde kesilmiştir. Her numune kumaş için aynı boyutlarda multifiber refakat kumaşı (Şekil 3.28) hazırlanmıştır. Multifiber refakat kumaşları; yün, poliakrilonitril, poliester, poliamid, pamuk ve selüloz triasetat esaslı dokuma kumaşlardır. Yıkama işlemi Roaches yıkama makinesindeki test tüpünün içerisine; hazırlanan numune kumaş, refakat kumaş, 150 ml yıkama haslığı çözeltisi ve 25 adet bilye eklenerek yıkama gerçekleşmiştir. Yıkama sıcaklığı 50°C'ye, yıkama süresi 30 dakikaya ayarlanmıştır. Yıkama haslığı testi gri skalaya (Şekil 3.28) göre değerlendirilmiştir. 1, en düşük haslık değeri iken; 5, en yüksek haslık değeri olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.28. Multifibre kumaş (solda) ve SDL Atlas gri skala (sağda)

Sürtme haslığı testi: Sürtme haslığı testi Sintaş firmasında, Mesdan marka sürtme haslık test cihazında (Şekil 3.29), UNI EN ISO 105X12:2001 standardına göre yapılmıştır. Katkılı örme kumaşlara yaş ve kuru sürtme haslığı testi uygulanmıştır. 140 mm x 50 mm boyutlarında hazırlanan örme kumaşlar, önce destile su ile ıslatılmıştır. Sonra cihazın kol kısmındaki numune bölgesine gergin bir şekilde yerleştirilmiştir. Cihaz; her numune için saniyede 1 kez, 10 cm uzunluğunda ileri geri hareketiyle sürtme işlemini gerçekleştirmiştir. Kuru sürtme haslığı testi, yaş sürtme haslığı testi ile aynı şekilde yapılmıştır. Kuru sürtme haslığı testinde; kumaş destile su ile ıslatılmamıştır. Yaş ve kuru sürtme işlemi sonrasında test edilen numune haslığı gri skalaya göre değerlendirilmiştir. En düşük haslık değeri, 1 iken; en yüksek haslık değeri, 5 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.29. Mesdan marka sürtme haslık cihazı

3.2.6. İstatistiksel analiz

Çalışmada üretilen üç farklı oranda termokromik pigment katkısı içeren örme çorapların hesaplanan ΔE değerlerinin değerlendirilmesinde, COSTAT istatistik programı kullanılarak iki faktörlü tamamen tesadüfi varyans analizi metodu uygulanmıştır. Anlamlılık düzeyi (α), 0,05 baz alınmıştır. Üç farklı termokromik pigment katkı oranı için, ayrı ayrı zaman ve sıcaklık faktörlerinin ΔE değerlerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca gruplar arasındaki farkın belirlenmesi için SNK analizi de yapılmıştır.

Matematiksel model ve hipotezler aşağıdaki gibi kurulmuştur;
Matematiksel model

$Y_{ijm} = \mu + U_i + K_j + (UK)_{ij} + e_{ijm}$

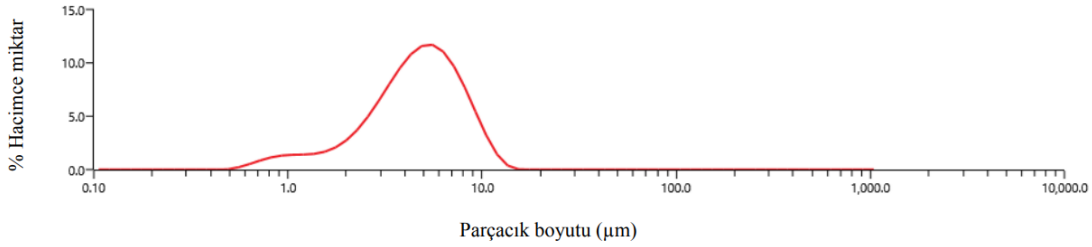
μ : Her iki faktörün bütün seviyeleri için ortak etki (ortalama)
U_i : Zaman etkisi
K_j : Sıcaklık etkisi
$(UK)_{ij}$: Zaman ve sıcaklık kesişiminin etkisi
e_{ijm} : Gözlemde bulunulan tesadüfi hata

Kullanılan H_0 hipotezleri
H_0 : Zamanın etkisi yoktur
H_{01} : Sıcaklığın etkisi yoktur
H_{02} : Zaman ve sıcaklık kesişiminin etkisi yoktur

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Termokromik Toz Pigmente Uygulanan Test ve Analizlerin Sonuçları

Çalışma kapsamında tedarik edilen termokromik toz pigmentin parçacık boyut analiz sonucu Şekil 4.1'de ve Çizelge 4.1'de verilmektedir. Katkı malzemesinin parçacık boyutu; eriyik çekim prosesinde kullanılan filtrelerin tıkanmaması, düze basınçlarının sabit kalması, düzeden çıkan eriyik akışının dengeli ve doğrusal olması için önem arz etmektedir. Toz katkı boyutunun, düze delik çapının en fazla üçte biri kadar olması istenmektedir (Rao, 2021). Çalışma kapsamında poliester filamentlerin üretildiği eriyik çekim makinasında 300 µm çapında deliklere sahip düzeler kullanılmıştır. Buna göre; termokromik pigment toz boyutlarının ortalama 4,7 µm olduğu, %90'ının boyutunun yaklaşık 8,4 µm'den küçük olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, termokromik toz pigmentin parçacık boyutunun eriyik çekim prosesinde kullanıma uygun olduğu anlaşılmıştır.

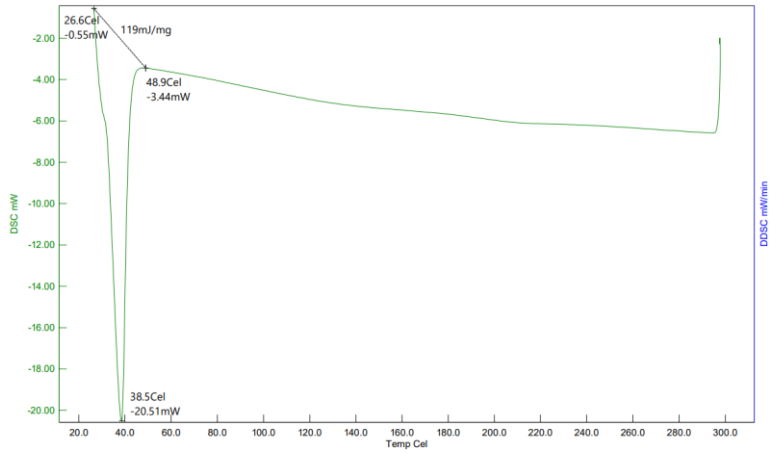


Şekil 4.1. Termokromik toz pigmente ait (%) hacimce miktar- parçacık boyutu grafiği

Çizelge 4.1. Termokromik toz pigmentin parçacık boyutu analiz sonucu

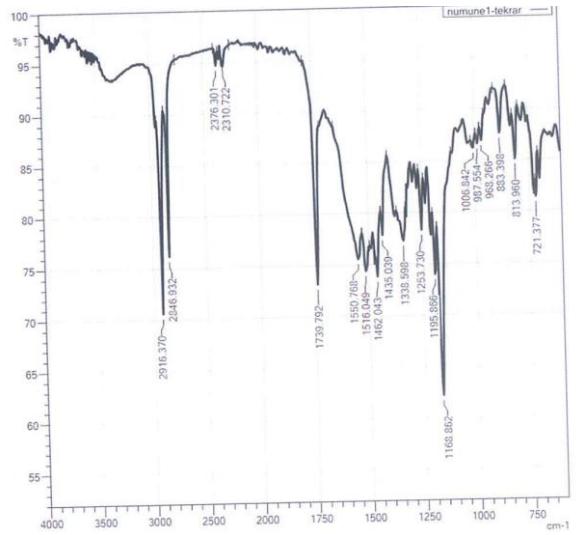
Katkı malzemesi	Dv (10) (µm)	Dv (50) (µm)	Dv (90) (µm)
Termokromik toz pigment	1,88	4,69	8,43

Termokromik toz pigmentin DSC termogramında (Şekil 4.2) tek bir endotermik pik görülmüştür. Termokromik toz pigmentin endotermik piki yaklaşık 27°C ile 48°C arasında olduğu tespit edilmiştir. Endotermik pikin tepe noktasının yaklaşık 38,5°C sıcaklıkta olduğu görülmüştür.



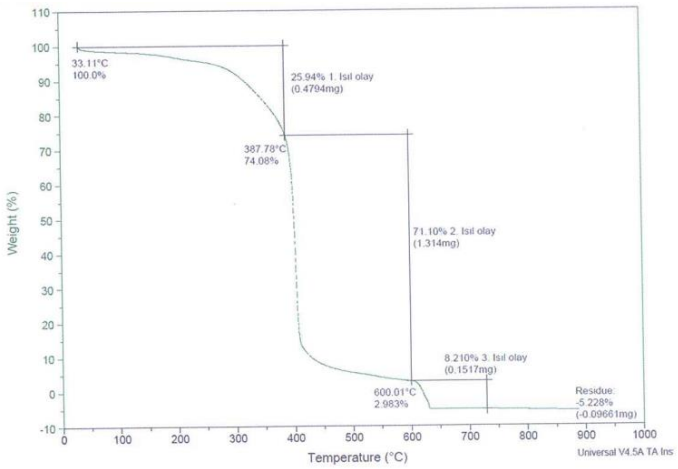
Şekil 4.2. Termokromik toz pigmentin DSC termogramı

Termokromik toz pigmente, molekül ve yapısında bulunan bağlar hakkında bilgi sahibi olmak için zayıflatılmış toplam yansıma (ATR) tekniği ile FTIR analizi yapılmıştır. Analiz sonucu Şekil 4.3'te verilmektedir. FTIR analiz sonucu literatür (Nandiyanto ve diğerleri, 2019; www.sigmaaldrich.com) dikkate alınarak yorumlanmıştır. Termokromik pigment içeren toz malzemenin FTIR spektrumda, 2916 cm^{-1}'deki şiddetli absorpsiyon piki, alkan grubu C-H gerilme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır. 2310 cm^{-1}'deki absorpsiyon piki, O=C=O geriliminden; 2376 cm^{-1}'deki absorpsiyon piki ise yapıdaki üçlü bağ varlığından kaynaklanmaktadır. 1739 cm^{-1}'deki pik C=O eğilme titreşiminden; 1550 cm^{-1}'deki pik, N=O gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. 1462 cm^{-1}'deki absorpsiyon piki, C-H eğilme titreşimini; 1435 cm^{-1}'deki ve 1338 cm^{-1}'deki düşük şiddetli absorpsiyon piki, O-H eğilme titreşimini göstermektedir. 1253 cm^{-1}'deki pik, C-O gerilme titreşimlerini göstermektedir. 987 cm^{-1} ve 968 cm^{-1}'deki pikler, alken grubuna ait C=C eğilme titreşimlerini ifade etmektedir. 883 cm^{-1}'deki ve 721 cm^{-1}'deki absorbsiyon pikleri C-H eğilme titreşimlerini göstermektedir.



Şekil 4.3. Termokromik toz pigmentin FTIR spektrumu

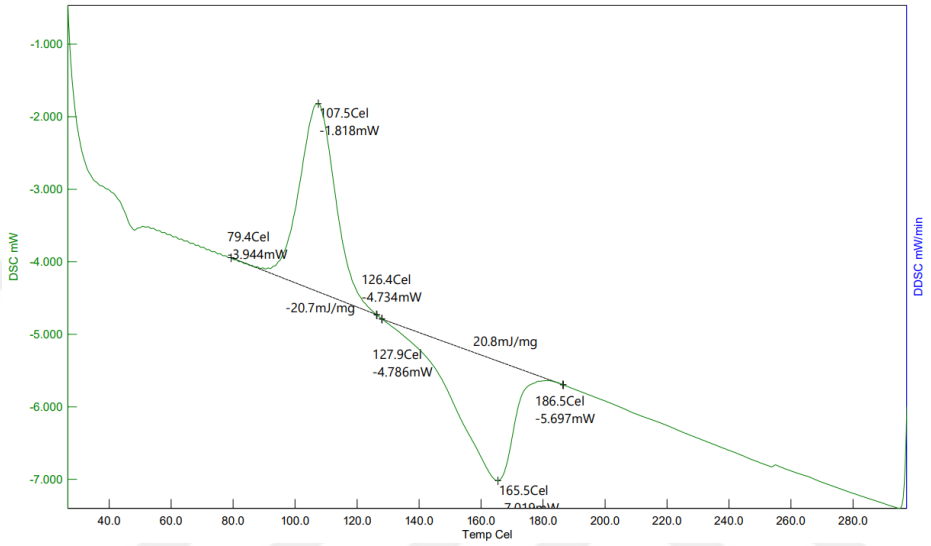
Termokromik toz pigmentin sıcaklığa bağlı kütle kaybının tespitinin yapıldığı TGA analizinden elde edilen grafik Şekil 4.4'te verilmektedir. Termokromik toz pigmentin, 388°C'de bozunmaya başlayıp, 600°C'de bozunmanın sonlandığı tespit edilmiştir. Malzemede, 33°C ile 387°C arasında yaklaşık %26 oranında organik madde kaybı olduğu tespit edilmiştir. İlk bozunmanın gerçekleştiği bölgede (388°C - 600°C sıcaklık aralığında), %71 oranında ağırlık kaybı tespit edilmiştir. 600°C ile 730°C aralığında piroliz meydana gelmiştir. Test sonunda yaklaşık %3 oranında madde kaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.4. Termokromik toz pigmentin TGA veri grafiği

4.2. Poliester Cipsine Uygulanan Test ve Analizlerin Sonuçları

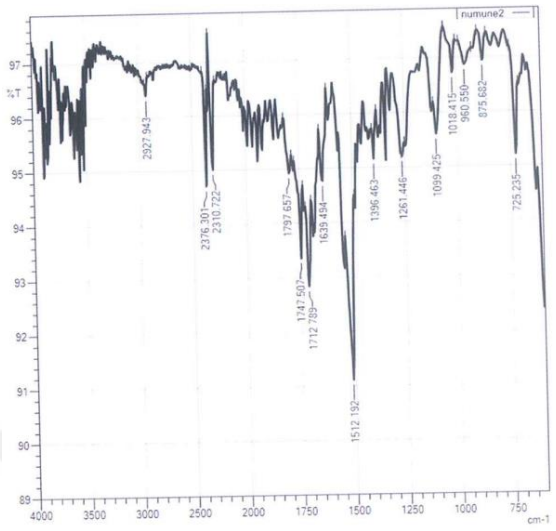
Poliester cipsine ait DSC termogramında (Şekil 4.5) tek bir egzotermik kristallenme piki ve endotermik pik görülmüştür. Poliester cipsinin erime sıcaklığı yaklaşık olarak 128°C - 187°C arasında tespit edilmiştir. Erime pikinin tepe noktası 165,5°C'dir.



Şekil 4.5. Poliester cipsin DSC termogramı

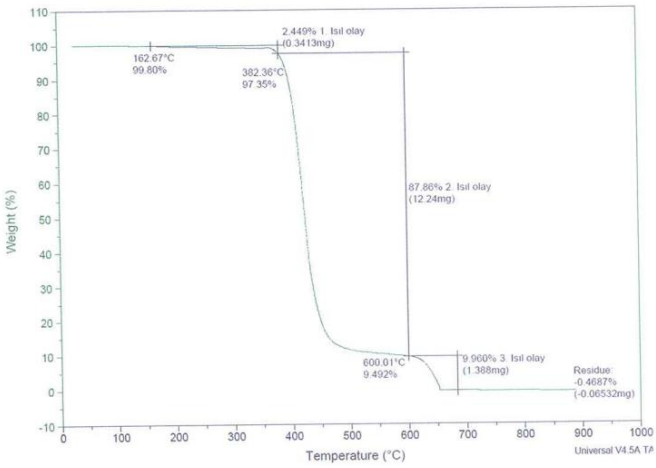
Poliester cipsin FTIR spektrumu Şekil 4.6'da verilmektedir. 1712 cm^{-1} orta şiddetli absorpsiyon piki karboksilik asit grubundan kaynaklanmaktadır. 4000 -1500 cm^{-1} aralığında fonksiyonel grup bölgesinde; 2927 cm^{-1}'deki düşük şiddetli absorpsiyon piki; C-H gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. 2376 cm-1 ve 2310 cm^{-1} orta şiddetli absorpsiyon pikleri; O=C=O gerilme titreşimini göstermektedir. 1797 cm^{-1}'deki düşük şiddetli absorpsiyon piki; C=O gerilme titreşiminden, 1747 cm^{-1}'deki orta şiddetli absorpsiyon piki; ester grubuna ait C=O gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. 1639 cm^{-1}'deki pik; aromatik halkaya ait C=C gerilim titreşimini göstermektedir. 1512 cm^{-1}'deki şiddetli pik; aromatik halkaya ait N-O gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. 1500- 400 cm^{-1} frekans aralığındaki parmak izi bölgesi incelendiğinde; 1396 cm^{-1}'deki düşük şiddetli absorpsiyon piki; O-H eğilme titreşimini, 1261 cm^{-1}'deki orta şiddetli pik; aromatik ester grubuna ait C-O gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. 1099 cm^{-1}'deki orta şiddetli pik; sekonder alkol grubu C-O gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. 875 cm^{-1}'deki pik; C-H eğilme titreşimini, 960

cm^{-1}'deki ve 725 cm^{-1}'deki pikler; alken grubu C=C eğilme titreşiminden kaynaklanmaktadır (Nandiyanto ve diğerleri, 2019; www.sigmaaldrich.com).



Şekil 4.6. Poliester cipsin FTIR spektrumu

Poliester cipsin sıcaklığa bağlı kütle kaybının tespiti için TGA analizi yapılmıştır. Poliester cipsin TGA analizi Şekil 4.7'de verilmektedir. Poliester 382°C'de bozunmaya başlayıp 600°C'de bozunma sonlanmıştır. 162°C ile 382°C arasında yaklaşık %2 oranında organik madde kaybı gözlemlenmiştir. 382°C ile 600°C'de aralığında %88 oranında ağırlık kaybı tespit edilmiştir. 600°C ile 690°C aralığında piroliz gerçekleşmiştir. %10 oranında kalıntı madde olduğu belirlenmiştir.

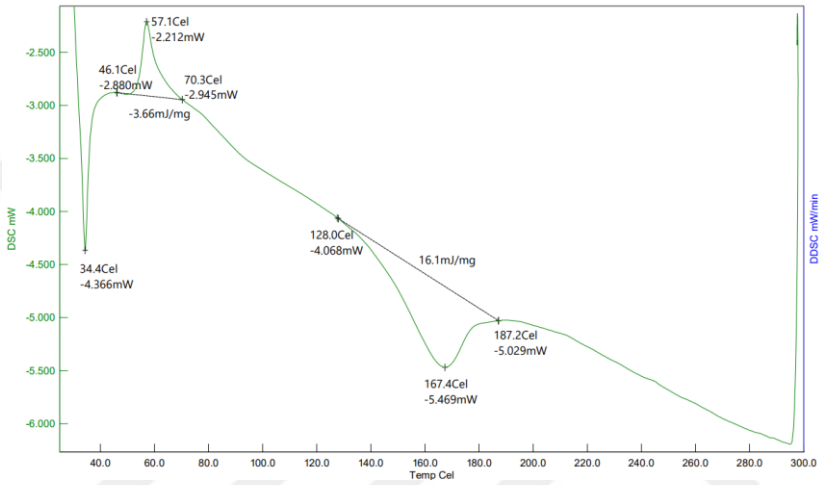


Şekil 4.7. Poliester cipsin TGA veri grafiği

Poliester cipsinin nem içeriğinin %0,17 olduğu tespit edilmiştir.

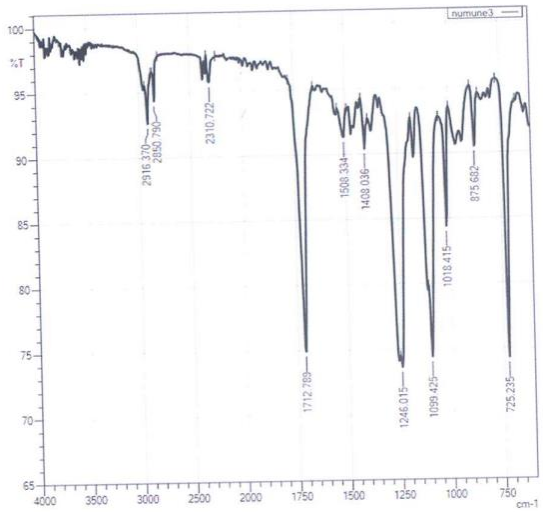
4.3. Termokromik Katkılı Masterbatche Uygulanan Test ve Analizlerin Sonuçları

Termokromik pigment katkılı masterbatche ait DSC termogramında (Şekil 4.8) tek bir egzotermik kristallenme piki ve iki adet endotermik pik görülmüştür. Masterbatch 26°C- 48°C arasındaki ilk endotermik pik termokromik pigmente, 128°C- 187°C arasındaki ikinci endotermik erime pik ise masterbatch polimerine aittir. Elde edilen veriler, termokromik toz pigmentin ve poliester cipsin DSC sonuçları ile uyumludur.



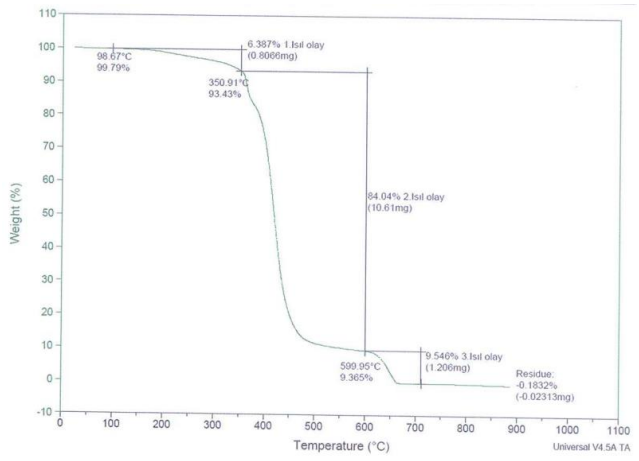
Şekil 4.8. Termokromik masterbatchin DSC termogramı

Termokromik masterbatchin FTIR analizi sonucu Şekil 4.9'da verilmektedir. Termokromik masterbatchin FTIR spektrumu incelendiğinde hem termokromik toz pigmentin hem de poliesterin spektrumdaki piklerin masterbatch spektrumunda da var olduğu görülmektedir. 2916 cm^{-1}'deki ve 2850 cm^{-1}'deki orta şiddetli pikler, alkan grubu C-H gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. Poliester cipsin ve termokromik toz pigmentin FTIR spektrumda olduğu gibi; 2310 cm^{-1}'deki pikin O=C=O gerilim titreşiminden kaynaklanmaktadır. Poliester cipsin FTIR spektrumunda 1712 cm^{-1}'deki absorpsiyon piki karboksilik asit grubunu işaret etmektedir. 1508 cm^{-1}'deki pikin N-O gerilim titreşimini, 1408 cm^{-1}'deki orta şiddetli absorpsiyon piki O-H eğilme titreşimini göstermektedir. 1246 cm^{-1}'deki şiddetli bandın C-O gerilim titreşimi olduğu tespit edilmiştir. 1099 cm^{-1}'deki şiddetli absorbsiyon bandı sekonder alkol grubu C-O gerilme titreşimini göstermektedir. 875 cm^{-1}'deki bandın C-H eğilme titreşimine ait olduğu, 725 cm^{-1}'deki şiddetli absorpsiyon piki alken grubu C=C eğilme titreşimini işaret etmektedir (Nandiyanto ve diğerleri, 2019; www.sigmaaldrich.com).



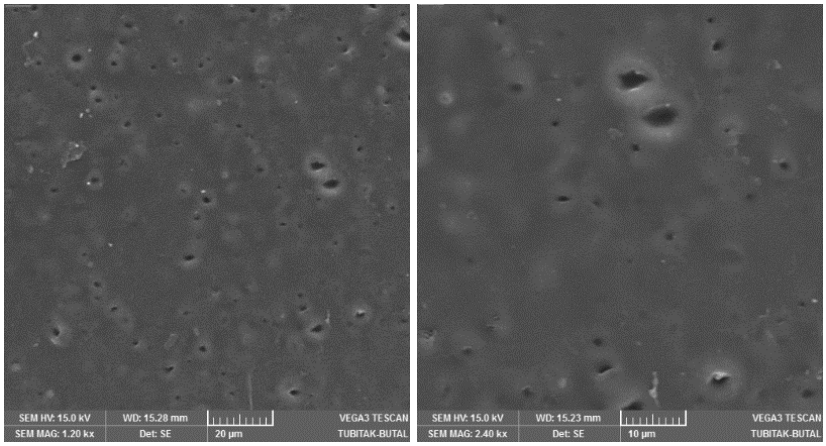
Şekil 4.9. Termokromik masterbatchin FTIR spektrumu

Termokromik masterbatchin TGA analiz sonucu Şekil 4.10'da verilmiştir. Termokromik masterbatch 351°C'de bozunmaya başlamış, 600°C'de bozunma sonlanmıştır. Termokromik masterbatchin bozunmaya başladığı sıcaklık; termokromik toz pigment ve poliester cipsin bozunmaya başladığı sıcaklığa göre 30°C daha düşüktür. 98°C ile 351°C arasında %6 oranında organik madde kaybı gözlemlenmiştir. 351°C ile 600°C arasında, %84 oranında ağırlık kaybı olduğu tespit edilmiştir. 600°C ile 720°C aralığında piroliz gerçekleştirilmiştir. Poliester cipste de görüldüğü gibi %10 oranında kalıntı madde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.10. Termokromik masterbatchin TGA veri grafiği

Termokromik masterbatchin Şekil 4.11'de verilen SEM görüntüsünde, masterbatch yapısındaki termokromik toz pigment gözlemlenmiştir.

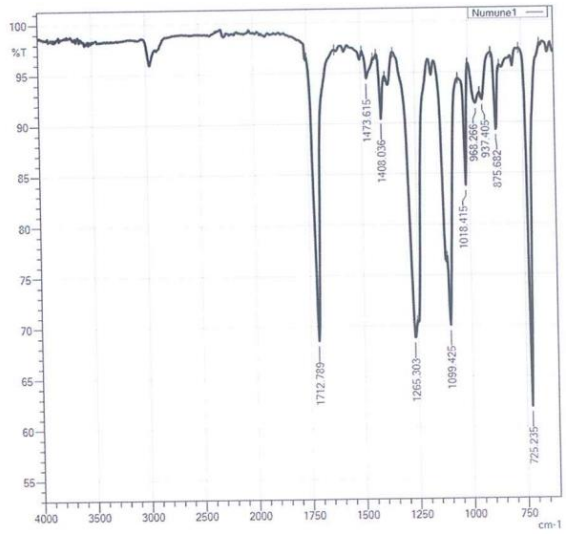


Şekil 4.11. Termokromik masterbatchin SEM görüntüsü

Termokromik masterbatchin %0,18 oranında nem içerdiği tespit edilmiştir.

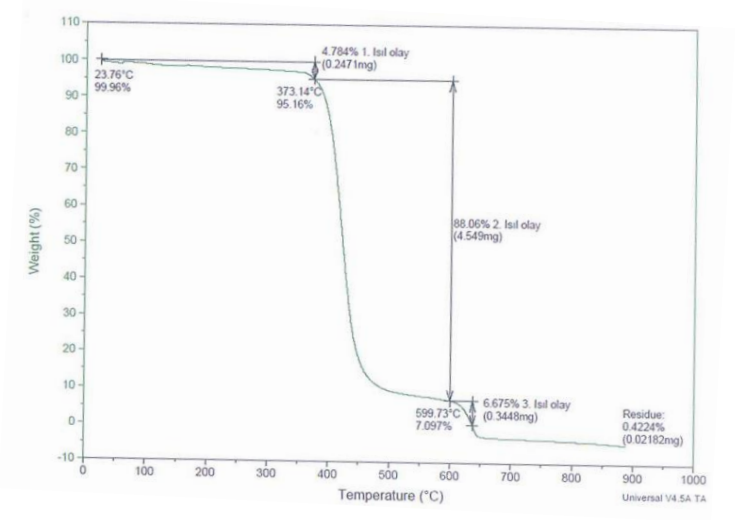
4.4. Poliester FDY İpliklere Uygulanan Test ve Analizlerin Sonuçları

Termokromik katkılı iplikler içerisinden en çok aktif madde bulunan F8 kodlu ipliğe FTIR analizi (Şekil 4.12) yapılmıştır. 1712 cm^{-1}'deki şiddetli absorpsiyon piki; poliester polimerine ait bant değeri olup, karboksilik asit grubu C=O gerilim titreşimini göstermektedir. 1408 cm^{-1}'deki absorpsiyon piki O-H eğilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. Hem poliester cipste hem termokromik katkılı masterbatchde hem de F8 ipliğinde bulunan 1099 cm^{-1}'deki absorbsiyon piki sekonder alkol grubu C-O gerilme titreşimini işaret etmektedir. Termokromik toz malzemede de bulunan, 968 cm^{-1} 'deki absorpsiyon piki; alken grubu C=C eğilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. 875 cm^{-1}'deki orta şiddetli absorpsiyon piki; C-H eğilme titreşimini göstermektedir. Poliester cips, termokromik masterbatch ve F8 ipliğinde görünen 725 cm^{-1}'deki bandın alken grubu C=C eğilme titreşimine ait olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.12. F8 kodlu poliester ipliğinin FTIR spektrumu

F8 kodlu ipliğe TGA analizi yapılmıştır ve TGA termogram sonuçları Şekil 4.13'te verilmiştir. TGA veri grafiğine göre; 23°C ile 373°C arasında %5 oranında organik madde kaybı gerçekleşmiştir. Bozunmaya başladığı sıcaklık 373°C'de olup bozunmanın sonlandığı sıcaklık 600°C'dir. Bu bölgede %88 oranında ağırlık kaybı olduğu tespit edilmiştir. 600°C ile 645°C aralığında piroliz gerçekleşmiştir ve %7 oranında kalıntı madde görülmüştür.



Şekil 4.13. F8 kodlu poliester ipliğin TGA veri grafiği

Çalışmada termokromik katkılı ve katkısız FDY ipliklere uygulanan fiziksel test sonuçları Çizelge 4.2'de verilmiştir.

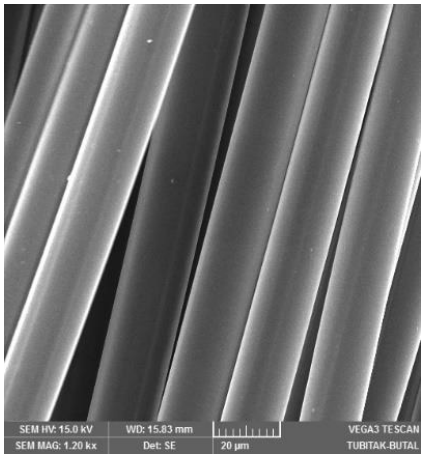
Çizelge 4.2. Poliester FDY ipliklere uygulanan fiziksel test sonuçları

FDY iplik kodu	İplik numarası (dtex)		Kopma mukavemeti (cN/dtex)		Kopma uzaması (%)		Düzgünsüzlük (%)		Kaynama çekme (%)	
	Ort.	(%) CV	Ort.	(%) CV	Ort.	(%) CV	Ort.	(%) CV	Ort.	(%) CV
F0	152,6	0,3	2,4	5,2	37,4	6,8	1,6	2,6	42,9	0,3
F3	114,4	0,7	2,0	0,1	27,7	6,2	3,1	4,2	41,1	2,6
F5	119,0	0,5	1,8	4,9	33,6	9,3	3,2	4,2	42,5	1,2
F8	121,7	0,6	1,7	2,2	38,9	8,0	3,7	4,7	47,5	3,8

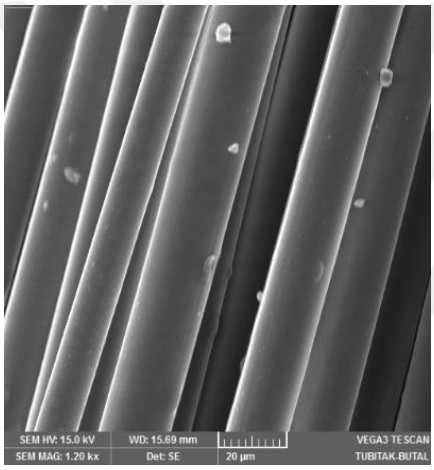
Elde edilen FDY iplik test sonuçları incelendiğinde, katkısız ipliğe göre %0,6 oranında pigment katkısı iplik içerisine eklendiğinde dtex değeri düşmüş, katkı oranı arttıkça dtex değerinde kademeli artış gözlemlenmiştir. İplik numarasındaki değişimin eriyik çekim iplik üretim aşamasındaki debi farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Termokromik pigment katkı oranı arttıkça dtex, kopma uzaması, düzgünsüzlük ve kaynama çekme değerinde artış; kopma mukavemeti değerinde azalma olduğu tespit edilmiştir.

Üretilen FDY ipliklerin fiziksel analiz sonuçlarının termokromik katkılı ve katkısız LOY ipliklerin fiziksel analiz sonuçlarıyla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. %1 ve %1,6 termokromik pigment katkılı FDY ipliklerin kumaş üretmek için uygun değerlerde olmadığı tespit edilmiştir. Fakat çorap örme makinasında örme kumaş üretilirken herhangi bir problem ile karşılaşılmamıştır.

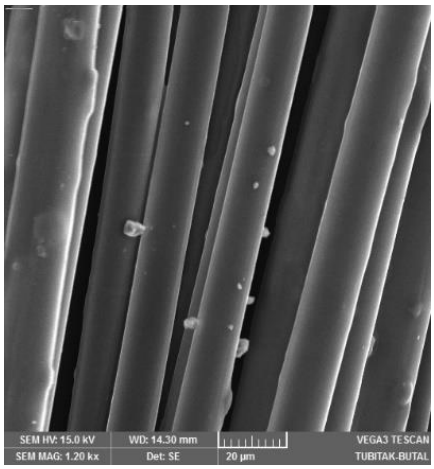
Çalışmada üretilen sırasıyla katkısız, %3, %5 ve %8 oranında termokromik pigment dozajlanmış FDY ipliklerin yüzey SEM görüntüleri sırasıyla, Şekil 4.14- 4.21'de gösterilmektedir. Görüntülerden katkı olarak kullanılan termokromik toz pigmentlerin poliester filamentlerin yapısındaki ve yüzeyindeki varlığı tespit edilmiştir. SEM görüntüleme sonucunda tespit edilen pigment katkı varlığı, katkılı ipliklerin düzgünsüzlük değerindeki değişim sonuçları ile desteklenmektedir.



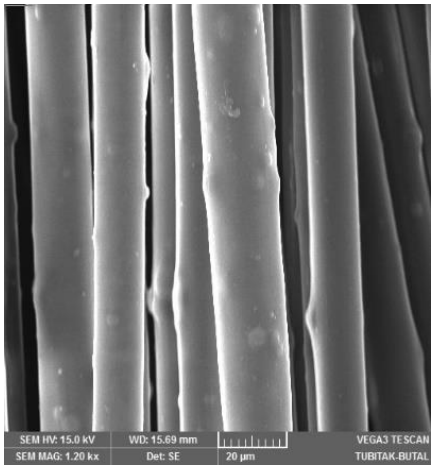
Şekil 4.14. F0 kodlu poliester ipliğinin SEM görüntüsü



Şekil 4.15. F3 kodlu poliester ipliğinin SEM görüntüsü



Şekil 4.16. F5 kodlu poliester ipliğinin SEM görüntüsü



Şekil 4.17. F8 kodlu poliester ipliğinin SEM görüntüsü

4.5. Poliester Örme Çoraplara Uygulanan Testlerin Sonuçları

Üretilen poliester örme çorapların gramaj, kalınlık ve sıklık ölçüm sonuçları Çizelge 4.3'te verilmektedir.

Çizelge 4.3. Örme çorapların gramaj, kalınlık ve sıklık ölçüm sonuçları

İplik kodu	**Kumaş gramajı** *(g/m²)*	**Kumaş kalınlığı** *(mm)*	**Kumaş sıklığı**	
			Çubuk *(adet/cm)*	**Sıra** *(adet/cm)*
J0	103,5 ± 0,01	0,437 ± 0,01	14 ± 0,45	15 ± 0,55
J3	72,8 ± 0,02	0,333 ± 0,02	14 ± 0,72	14 ± 0,55
J5	74,6 ± 0,01	0,337 ± 0,02	14 ± 0,72	13 ± 0,55
J8	75,3 ± 0,01	0,353 ± 0,01	14 ± 0,55	13 ± 0,55

Katkısız kumaşa göre; termokromik pigment katkılı kumaş gramajı önce düştüğü sonra arttığı tespit edilmiştir. Termokromik katkılı kumaşlar kendi içerisinde incelendiğinde; termokromik katkı oranı arttıkça örme çorap gramajında artış olduğu gözlemlenmiştir. %0,6 termokromik pigment katkı oranındaki kumaşın gramajı, katkısız kumaş gramajına göre %29,6 daha düşük çıkmıştır. %1 termokromik pigment katkı oranındaki kumaşın gramajı, katkısız kumaşa göre %27,9 ve %1,6 termokromik katkı oranındaki kumaşın gramajı, katkısız kumaşa göre %27,2 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Kumaş gramaj ölçüm sonuçlarında olduğu gibi kumaş kalınlıkları da katkı eklendiğinde, önce bir miktar düşmüş sonra artmıştır. %0,6 termokromik pigment katkı oranındaki

kumaş kalınlığı, katkısız kumaş kalınlığına göre %23,8 daha ince olduğu tespit edilmiştir. %1,6 termokromik pigment oranındaki kumaş kalınlığının katkısız kumaşa göre %19,2 daha ince olduğu belirlenmiştir. İpliklerin kumaş kalınlık ve gramaj değerlerinin dtex değerleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Katkılı ve katkısız örme çorapların kumaş sıklık değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

Etüv içerisinde 30°C, 45°C, 60°C, 75°C, 90°C, 120°C sıcaklıklarda 1 dakika, 3 dakika ve 5 dakika boyunca bekletilen katkısız ve farklı termokromik pigment katkılı çorapların spektrofotometre renk ölçümlerinin ortalama ve standart sapma değerleri ile renk farkı değerleri Çizelge 4.4 - 4.9'da verilmektedir.

Çizelge 4.4. Katkılı ve katkısız örme çorapların 30°C sıcaklıkta bekletildikten sonraki spektrofotometre değerleri

			L	a	b	ΔE
	REF (J0)		91,38	-0,55	3,57	-
	REF (J3)		85,38	-1,95	-2,38	-
	REF (J5)		75,72	-3,09	-11,53	-
	REF (J8)		73,62	-3,35	-11,67	-
30°C	1 dakika	J0	90,76 ± 0,17	-0,46 ± 0,17	3,52 ± 0,52	0,78 ± 0,20
		J3	86,07 ± 0,16	-2,06 ± 0,06	-2,05 ± 0,12	0,79 ± 0,15
		J5	76,39 ± 0,11	-3,17 ± 0,03	-10,88 ± 0,15	0,93 ± 0,16
		J8	73,85 ± 0,20	-3,34 ± 0,01	-11,71 ± 0,32	0,42 ± 0,08
	3 dakika	J0	90,66 ± 0,45	-0,52 ± 0,06	3,63 ± 0,37	0,81 ± 0,40
		J3	86,13 ± 0,29	-2,01 ± 0,05	-1,91 ± 0,13	0,90 ± 0,30
		J5	76,41 ± 0,34	-3,18 ± 0,02	-10,70 ± 0,23	1,09 ± 0,37
		J8	74,57 ± 0,29	-3,32 ± 0,04	-10,88 ± 0,23	1,24 ± 0,33
	5 dakika	J0	90,88 ± 0,59	-0,54 ± 0,05	3,81 ± 0,25	0,79 ± 0,24
		J3	86,13 ± 0,22	-1,92 ± 0,05	-1,63 ± 0,08	1,08 ± 0,16
		J5	76,87 ± 0,34	-3,18 ± 0,03	-10,27 ± 0,19	1,75 ± 0,21
		J8	74,41 ± 0,24	-3,34 ± 0,02	-10,91 ± 0,15	1,10 ± 0,26

Çizelge 4.5. Katkılı ve katkısız örme çorapların 45°C sıcaklıkta bekletildikten sonraki spektrofotometre değerleri

			L	a	b	ΔE
45°C	REF (J0)		91,52	-0,55	3,91	-
	REF (J3)		86,97	-1,86	-1,03	-
	REF (J5)		75,98	-3,13	-10,4	-
	REF (J8)		74,85	-3,46	-10,81	-
	1 Dakika	J0	91,22 ± 0,49	-0,52 ± 0,05	3,88 ± 0,36	0,58 ± 0,30
		J3	89,72 ± 0,99	-0,92 ± 0,32	2,85 ± 1,05	4,71 ± 1,32
		J5	84,33 ± 1,37	-2,09 ± 0,49	-1,36 ± 2,14	12,35 ± 2,52
		J8	80,26 ± 1,01	-3,04 ± 0,18	-4,23 ± 1,34	8,33 ± 2,01
	3 Dakika	J0	91,10 ± 0,29	-0,47 ± 0,06	3,71 ± 0,27	0,54 ± 0,25
		J3	90,17 ± 0,62	-0,74 ± 0,25	3,42 ± 0,72	5,60 ± 0,94
		J5	85,82 ± 0,90	-1,52 ± 0,37	1,49 ± 1,65	15,53 ± 1,80
		J8	83,8 ± 1,14	-2,10 ± 0,40	0,86 ± 1,60	14,77 ± 1,99
	5 Dakika	J0	91,22 ± 0,45	-0,52 ± 0,04	3,81 ± 0,18	0,48 ± 0,27
		J3	90,60 ± 0,58	-0,62 ± 0,19	3,85 ± 0,72	6,21 ± 0,87
		J5	86,59 ± 0,80	-0,84 ± 0,21	3,74 ± 0,72	17,89 ± 0,94
		J8	86,56 ± 0,24	-0,78 ± 0,12	5,38 ± 0,35	20,16 ± 0,32

Çizelge 4.6. Katkılı ve katkısız örme çorapların 60°C sıcaklıkta bekletildikten sonraki spektrofotometre değerleri

			L	a	b	ΔE
60°C	REF (J0)		91,49	-0,56	3,63	-
	REF (J3)		85,83	-1,70	-0,28	-
	REF (J5)		76,02	-3,16	-9,92	-
	REF (J8)		73,17	-3,09	-10,07	-
	1 Dakika	J0	91,61 ± 0,33	-0,54 ± 0,10	3,96 ± 0,32	0,52 ± 0,23
		J3	88,99 ± 0,60	-0,49 ± 0,12	4,57 ± 0,39	5,94 ± 0,52
		J5	85,84 ± 0,51	-0,62 ± 0,09	5,08 ± 0,26	18,11 ± 0,44
		J8	85,31 ± 0,99	-0,62 ± 0,04	5,64 ± 0,27	20,02 ± 0,75
	3 Dakika	J0	91,12 ± 0,47	-0,49 ± 0,07	3,09 ± 0,55	0,88 ± 0,35
		J3	88,83 ± 0,69	-0,39 ± 0,02	5,18 ± 0,25	6,38 ± 0,47
		J5	85,14 ± 0,56	-0,50 ± 0,04	5,53 ± 0,26	18,14 ± 0,39
		J8	86,00 ± 0,67	-0,53 ± 0,05	6,13 ± 0,19	20,83 ± 0,48
	5 Dakika	J0	90,97 ± 0,39	-0,60 ± 0,16	3,68 ± 0,87	1,26 ± 0,69
		J3	88,57 ± 0,78	-0,39 ± 0,02	5,34 ± 0,23	6,42 ± 0,46
		J5	84,94 ± 0,57	-0,46 ± 0,03	5,80 ± 0,23	18,29 ± 0,39
		J8	85,74 ± 0,73	-0,49 ± 0,03	6,42 ± 0,25	20,91 ± 0,57

Çizelge 4.7. Katkılı ve katkısız örme çorapların 75°C sıcaklıkta bekletildikten sonraki spektrofotometre değerleri

			L	a	b	ΔE
75°C	REF (J0)		91,44	-0,70	4,75	-
	REF (J3)		85,33	-2,15	-2,41	-
	REF (J5)		75,86	-3,13	-10,95	-
	REF (J8)		73,82	-3,27	-11,76	-
	1 Dakika	J0	90,14 ± 0,77	-0,63 ± 0,12	4,24 ± 0,67	1,62 ± 0,53
		J3	88,30 ± 0,39	-0,42 ± 0,03	6,00 ± 0,39	9,09 ± 0,35
		J5	85,88 ± 0,55	-0,62 ± 0,09	6,16 ± 0,81	20 ± 0,91
		J8	85,01 ± 0,43	-0,72 ± 0,13	6,38 ± 0,48	21,47 ± 0,57
	3 Dakika	J0	90,40 ± 0,73	-0,54 ± 0,03	3,96 ± 0,11	1,38 ± 0,59
		J3	89,31 ± 0,40	-0,39 ± 0,01	6,19 ± 0,22	9,65 ± 0,25
		J5	86,68 ± 0,22	-0,43 ± 0,05	7,03 ± 0,19	21,17 ± 0,26
		J8	85,49 ± 0,58	-0,43 ± 0,05	7,49 ± 0,25	22,70 ± 0,43
	5 Dakika	J0	90,79 ± 0,52	-0,42 ± 0,10	3,90 ± 0,15	1,17 ± 0,32
		J3	88,96 ± 0,56	-0,43 ± 0,04	6,49 ± 0,38	9,78 ± 0,34
		J5	86,70 ± 0,34	-0,39 ± 0,03	7,32 ± 0,15	21,43 ± 0,27
		J8	85,72 ± 0,36	-0,33 ± 0,04	7,98 ± 0,15	23,24 ± 0,27

Çizelge 4.8. Katkılı ve katkısız örme çorapların 90°C sıcaklıkta bekletildikten sonraki spektrofotometre değerleri

			L	a	b	ΔE
90°C	REF (J0)		90,94	-0,55	3,8	-
	REF (J3)		86,04	-2,12	-2,29	-
	REF (J5)		75,55	-3,14	-11,18	-
	REF (J8)		74,22	-3,31	-11,62	-
	1 Dakika	J0	90,57 ± 0,72	-0,47 ± 0,09	4,41 ± 0,31	0,97 ± 0,38
		J3	90,78 ± 0,16	-0,21 ± 0,07	6,35 ± 0,16	10,04 ± 0,14
		J5	86,82 ± 0,58	-0,33 ± 0,12	7,33 ± 0,56	21,86 ± 0,77
		J8	86,77 ± 0,17	-0,28 ± 0,10	7,61 ± 0,37	23,16 ± 0,39
	3 Dakika	J0	91,04 ± 0,36	-0,46 ± 0,04	4,52 ± 0,08	0,80 ± 0,14
		J3	90,44 ± 0,62	-0,29 ± 0,10	6,37 ± 0,33	9,91 ± 0,32
		J5	87,59 ± 0,37	-0,23 ± 0,02	8,07 ± 0,10	22,90 ± 0,27
		J8	87,14 ± 0,09	-0,09 ± 0,03	8,36 ± 0,12	24,02 ± 0,13
	5 Dakika	J0	91,00 ± 0,43	-0,46 ± 0,02	4,57 ± 0,08	0,87 ± 0,16
		J3	90,37 ± 0,44	-0,29 ± 0,10	6,57 ± 0,17	10,04 ± 0,25
		J5	87,67 ± 0,55	-0,23 ± 0,02	8,25 ± 0,12	23,14 ± 0,28
		J8	87,16 ± 0,20	0,001 ± 0,05	8,66 ± 0,17	24,29 ± 0,22

Çizelge 4.9. Katkılı ve katkısız örme çorapların 120°C sıcaklıkta bekletildikten sonraki spektrofotometre değerleri

			L	a	b	ΔE
	REF (J0)		91,88	-0,58	3,98	-
	REF (J3)		86,16	-1,92	-1,66	-
	REF (J5)		76,28	-2,99	-10,61	-
	REF (J8)		74,83	-3,45	-11,22	-
120°C	1 Dakika	J0	90,94 ± 0,84	-0,56 ± 0,03	4,48 ± 0,25	1,26 ± 0,51
		J3	88,78 ± 0,51	-0,32 ± 0,03	6,8 ± 0,14	9,01 ± 0,18
		J5	88,05 ± 0,32	-0,19 ± 0,10	8,26 ± 0,43	22,42 ± 0,53
		J8	87,11 ± 0,42	-0,22 ± 0,12	8,82 ± 0,43	23,73 ± 0,57
	3 Dakika	J0	91,61 ± 0,67	-0,57 ± 0,01	4,82 ± 0,21	1,07 ± 0,28
		J3	88,29 ± 0,58	-0,28 ± 0,03	7,09 ± 0,24	9,17 ± 0,34
		J5	88,20 ± 0,29	-0,04 ± 0,08	8,73 ± 0,20	22,92 ± 0,31
		J8	87,60 ± 0,17	0,03 ± 0,09	9,52 ± 0,17	24,60 0,20
	5 Dakika	J0	91,87 ± 0,26	-0,60 ± 0,02	5,03 ± 0,11	1,08 ± 0,12
		J3	88,85 ± 0,32	-0,20 ± 0,04	7,76 ± 0,16	9,95 ± 0,22
		J5	87,84 ± 0,64	0,20 ± 0,08	9,34 ± 0,19	23,39 ± 0,24
		J8	87,65 ± 0,23	0,22 ± 0,07	9,98 ± 0,14	25,05 ± 0,18

Renk farkı değerleri incelendiğinde; 30°C sıcaklıkta, 1 dakika, 3 dakika ve 5 dakika sürelerde hem katkısız hem de termokromik pigment katkılı çorapların renk değişiminin gerçekleşmediği tespit edilmiştir. Fakat 45°C'de, 60°C'de, 75°C'de, 90°C'de ve 120°C'de renk değişiminin, katkı dozajı ve etüvde tutma süresi ile doğru orantılı olarak belirgin hale geldiği görülmüştür.

Çizelge 4.5'teki L, a*, b* ve ΔE değerleri; J3, J5 ve J8 kodlu örme çorapların 45°C sıcaklıktaki etüvde bekleme süresi arttıkça renk farkının arttığı; örme kumaş renginin açıldığı, a* değerinin '-' (yeşil) yönünden '+' (kırmızı) yönüne doğru; b* değerinin '-' (mavi) yönünden '+' (sarı) yönüne doğru hareket ettiği gözlemlenmiştir. Örme çorapların; termokromik pigment katkı oranı arttıkça ve etüvde beklediği zaman arttıkça, renk farkı değerinin arttığı tespit edilmiştir. J3 kodlu örme çorabın referans L

değeri ile 5 dakika etüvde bekledikten sonraki L değeri arasında %4'lük '+' yönünde artış tespit edilmiştir. J5 kodlu örme çorabın referans L değeri ile 5 dakika etüvde bekledikten sonraki L değeri arasında %14'lük '+' yönünde artış gözlemlenmiştir. J8 kodlu örme çorabın referans L değeri ile 5 dakika bekledikten sonraki L değeri arasında %15'lik '+' yönünde artış tespit edilmiştir.

Çizelge 4.6'da verilen 60°C sıcaklıkta J3, J5, J8 kodlu örme çorapların renk sonuçlarında; sıcaklığa maruz bırakılan süre ve termokromik pigment katkı oranı arttıkça L, a*, b* ve ΔE değerlerinin '+' yönde arttığı gözlemlenmiştir. J3 kodlu örme çorabın referans L değeri ile etüvde 5 dakika bekledikten sonra ölçülen L değeri arasında %3,2'lik artış tespit edilmiştir. J5 kodlu örme çorabın referans L değeri ile etüvde 5 dakika bekledikten sonra ölçülen L değeri arasında %11,7'lik artış gözlemlenmiştir. J8 kodlu örme çorabın referans L değeri ile etüvde 5 dakika bekledikten sonra ölçülen L değeri arasında %17,2'lik artış tespit edilmiştir. Termokromik katkılı örme çorapların katkı oranı ve sıcaklığa maruz kalma süresi arttıkça renk farkındaki değişimin arttığı görülmüştür.

Çizelge 4.7'de tespit edilen L, a*, b* ve ΔE değerleri; J3, J5 ve J8 kodlu örme çorapların 75°C sıcaklıktaki etüvde bekleme süresi arttıkça renk farkının arttığını göstermektedir. J3 kodlu örme çorabın referans L değeri ile etüvde 5 dakika bekledikten sonra ölçülen L değeri arasında %4,2'lik artış tespit edilmiştir. J5 kodlu örme çorabın referans L değeri ile etüvde 5 dakika bekledikten sonra ölçülen L değeri arasında %14,3'lük artış gözlemlenmiştir. J8 kodlu örme çorabın referans L değeri ile etüvde 5 dakika bekledikten sonra ölçülen L değeri arasında %16,1'lik artış tespit edilmiştir.

90°C ve 120°C sıcaklıklarda ölçülen L, a*, b* ve ΔE değerlerinde (Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9), hemen hemen aynı artışlar gözlemlenmiştir. 90°C'de ve 120°C'de J3 kumaşının referans L değeri ile etüvde 5 dakika bekledikten sonra ölçülen L değeri arasında %4'lük; J5 kumaşı için %15'lik ve J8 kumaşı için %17'lik artış tespit edilmiştir.

Katkısız örme çorapların renginin; etüvde bekletme süreleri ve etüv sıcaklığı arttıkça sarılık ekseninde '+' yönünde renk değiştiği gözlemlenmiştir.

Renk ölçümü yapılan poliester örme çorapların fotoğrafları Çizelge 4.10 - 4.15'de verilmektedir. Katkılı kumaşların sıcaklık etkisiyle renk değiştirdiği, sıcaklık uygulama süresinin artmasıyla renk değişiminin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumda, 45°C'deki renk farkının; tüm zamanlarda ve tüm termokromik katkı oranlarında en yüksek değere sahip olduğu belirlenmiştir. Etüvde bekleme süreleri renk farkını etkilemiş, fakat önemli ölçüde değiştirmemiştir. Etüvde bekleme süresinde en yüksek renk farkı değeri 1 dakikada gözlemlenmiştir. Ayrıca katkı oranı arttıkça kumaşın b* değerinin '-' (mavi) yönde arttığı ve renk farkı değerinin '+' (açıklık) yönünde arttığı anlaşılmıştır. Mavi renge sahip termokromik katkılı örme çorapların sıcaklık ve zamana bağlı olarak beyaz renge dönüştüğü hem gözle hem de spektrofotometre ölçüm değerleri ile tespit edilmiştir.

Çizelge 4.10. 30°C sıcaklığa maruz bırakılan poliester örme çorapların fotoğrafları

J0	J3	J5	J8
Isıl işlem öncesi			
			
1 dakika ısıl işlem sonrası			
			
3 dakika ısıl işlem sonrası			
			
5 dakika ısıl işlem sonrası			
			

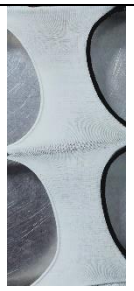
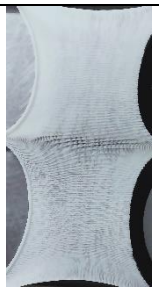
Çizelge 4.11. 45°C sıcaklığa maruz bırakılan poliester örme çorapların fotoğrafları

J0	J3	J5	J8
Isıl işlem öncesi			
			
1 dakika ısıl işlem sonrası			
			
3 dakika ısıl işlem sonrası			
			
5 dakika ısıl işlem sonrası			
			

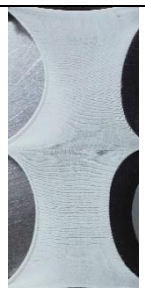
Çizelge 4.12. 60°C sıcaklığa maruz bırakılan poliester örme çorapların fotoğrafları

J0	J3	J5	J8
Isıl işlem öncesi			
			
1 dakika ısıl işlem sonrası			
			
3 dakika ısıl işlem sonrası			
			
5 dakika ısıl işlem sonrası			
			

Çizelge 4.13. 75°C sıcaklığa maruz bırakılan poliester örme çorapların fotoğrafları

J0	J3	J5	J8
Isıl işlem öncesi			
			
1 dakika ısıl işlem sonrası			
			
3 dakika ısıl işlem sonrası			
			
5 dakika ısıl işlem sonrası			
			

Çizelge 4.14. 90°C sıcaklığa maruz bırakılan poliester örme çorapların fotoğrafları

J0	J3	J5	J8
Isıl işlem öncesi			
			
1 dakika ısıl işlem sonrası			
			
3 dakika ısıl işlem sonrası			
			
5 dakika ısıl işlem sonrası			
			

Çizelge 4.15. 120°C sıcaklığa maruz bırakılan poliester örme çorapların fotoğrafları

J0	J3	J5	J8
Isıl işlem öncesi			
			
1 dakika ısıl işlem sonrası			
			
3 dakika ısıl işlem sonrası			
			
5 dakika ısıl işlem sonrası			
			

Termokromik pigment katkılı örme çorapların yıkama sonrası ve yaş/kuru sürtme sonrası davranışlarını gözlemlemek için yıkama ve sürtme haslığı testleri yapılmıştır. Yıkama haslığı, baskılı veya boyalı kumaşın yıkama şartlarında renginin değişip değişmediğini kontrol etmek amacıyla yapılır (www.megep.meb.gov.tr , 2015). Termokromik katkılı poliester örme çoraplara yapılan yıkama haslığı testinin sonuçları, Çizelge 4.16'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, tüm katkılı kumaşların en yüksek haslık değerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.16. Poliester örme çorapların yıkama haslığı test sonuçları

Kumaş kodu	Kullanılan refakat kumaşı ile yıkama haslığı değeri					
	Selüloz triasetat	Pamuk	Poliamid	Poliester	Poliakrilo nitril	Yün
J3	5	5	5	5	5	5
J5	5	5	5	5	5	5
J8	5	5	5	5	5	5

Sürtmeye karşı renk haslığı, baskılı veya boyalı tekstil mamulünün temas halinde bulunduğu başka bir tekstil mamulüne sürtme sonucu renginin geçmemesi yani rengini kaybetmemesi olarak tanımlanmaktadır (Demir ve Mutlu, 2005). Termokromik katkılı poliester örme çorapların sürtme haslığı test sonuçları Çizelge 4.17'de verilmiştir. Yaş ve kuru sürtme haslığı sonuçlarında, test edilen tüm katkılı kumaşların en yüksek haslık değerine (5) sahip olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.17. Poliester örme çorapların sürtme haslığı test sonuçları

Kumaş kodu	Test türü	Sürtme haslığı değeri
J3	Kuru	5
	Yaş	5
J5	Kuru	5
	Yaş	5
J8	Kuru	5
	Yaş	5

4.6. Poliester Örme Çorapların İstatistik Analiz Sonuçları

Ayrıca çalışmada, termokromik pigment katkılı poliester örme çorapların ölçülen renk farkı (ΔE) değerleri üzerinde istatistiksel analiz yapılmıştır (Çizelge 4.18). Üç farklı termokromik pigment katkı oranı için; farklı zamanda ve farklı sıcaklıkta renk değişimi

değerleri istatistiksel analiz ile değerlendirilmiştir. %0,6, %1 ve %1,6 termokromik pigment katkı oranına sahip kumaşların varyans analiz ve SNK sonuçları Çizelge 4.18 – 4.23'te verilmiştir.

Çizelge 4.18. J3 kodlu poliester örme çorapların renk farkı değerlerinin varyans analizi ve SNK sonuçları

Faktör	**ΔE**	
	P /Anlamlılık değeri	**SNK analiz sonuçları [#]**
Zaman	0,0000/***	5 (a)
		3 (b)
		1 (c)
Sıcaklık	0,0000/***	90 (a)
		75 (b)
		120 (b)
		60 (c)
		45 (d)
		30 (e)
Zaman x sıcaklık	0,0013/**	

[#] Farklı harfler, değerler arasında istatistiki fark olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.19. J5 kodlu poliester örme çorapların renk farkı değerlerinin varyans analizi ve SNK sonuçları

Faktör	**ΔE**	
	P /Anlamlılık değeri	**SNK analiz sonuçları [#]**
Zaman	0,0000/***	5 (a)
		3 (b)
		1 (c)
Sıcaklık	0,0000/***	120 (a)
		90 (a)
		75 (b)
		60 (c)
		45 (d)
		30 (e)
Zaman x sıcaklık	0,0000/***	

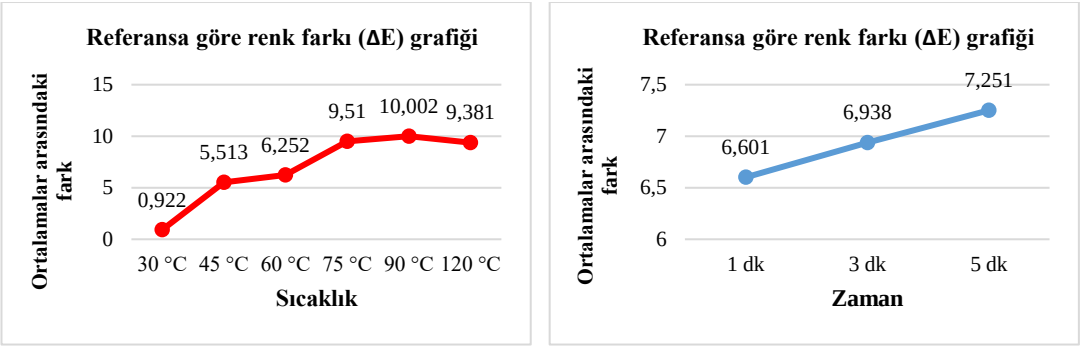
[#] Farklı harfler, değerler arasında istatistiki fark olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.20. J8 kodlu poliester örme çorapların renk farkı değerlerinin varyans analizi ve SNK sonuçları

Faktör	ΔE	
	P /Anlamlılık değeri	SNK analiz sonuçları #
Zaman	0,0634/ns	5 (a)
		3 (a)
		1 (a)
Sıcaklık	0,0000/***	75 (a)
		120 (a)
		90 (a)
		60 (ab)
		45 (b)
		30 (c)
Zaman x sıcaklık	0,3561/ns	

Farklı harfler, değerler arasında istatistiki fark olduğunu göstermektedir.

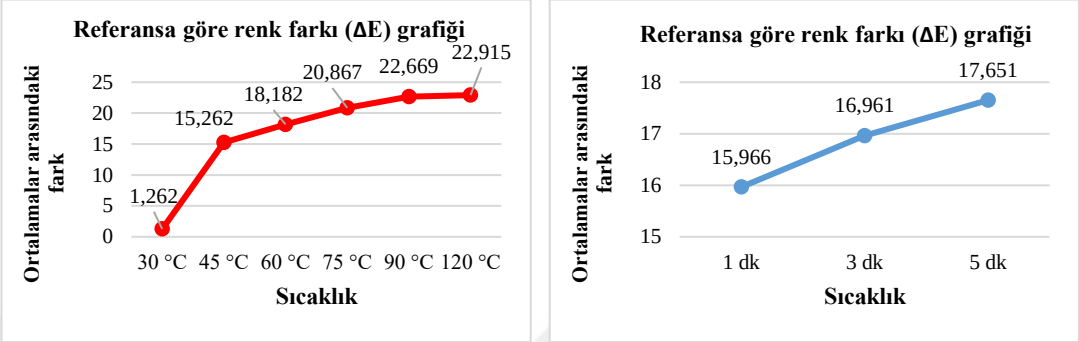
%0,6 oranında termokromik pigment katkısına sahip örme kumaşın istatistiki analizi sonucu incelendiğinde; zaman ve sıcaklık faktörlerinin renk farkı değerine binde bir seviyesinde, zaman ve sıcaklık faktörlerinin kesişiminin ise yüzde bir seviyesinde anlamlı etkisinin olduğu görülmüştür (Şekil 4.18). Zaman faktörünün, ΔE değerine etkisinin doğru orantılı olduğu belirlenmiştir. Sıcaklık faktörü incelendiğinde, en yüksek ΔE değeri 90°C sıcaklıkta tespit edilmiştir. Ayrıca ΔE değeri, 30°C'den 45°C'ye ve 60°C'den 75°C'ye geçişte en fazla değişim yüzdesine sahiptir.



Şekil 4.18. J3 kodlu poliester örme çorapların renk farkı değerlerine sıcaklık (solda) ve zaman (sağda) faktörlerinin etkisi

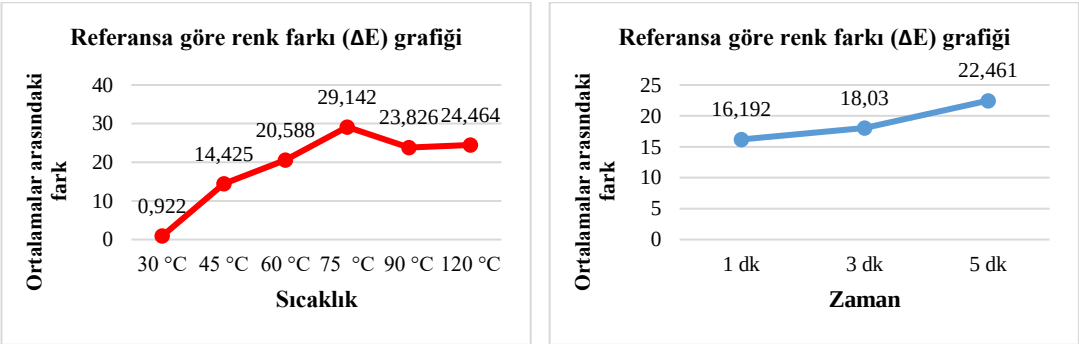
%1 oranında termokromik pigment oranında katkı içeren örme çorabın renk değişim verileri incelendiğinde; zaman faktörünün, sıcaklık faktörünün ve her iki faktörün kesişiminin binde bir seviyesinde anlamlı etkisinin olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.19).

Zaman arttıkça renk farkındaki değişimin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca sıcaklık arttıkça renk farkının arttığı belirlenmiş olup; en fazla değişim yüzdesi, sıcaklığın 30°C'den 45°C'ye çıkılmasıyla elde edilmiştir. 90°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda renk farkının çok fazla etkilenmediği istatistiki verilerden tespit edilmiştir.



Şekil 4.19. J5 kodlu poliester örme çorapların renk farkı değerlerine sıcaklık (solda) ve zaman (sağda) faktörlerinin etkisi

%1,6 oranında termokromik pigment katkı içeren örme kumaşların istatistiki analiz sonucunda; sıcaklık faktörünün renk farkı değerine binde bir seviyesinde anlamlı etkisinin olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.20). Zaman faktörünün renk farkı değerine anlamlı etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Zaman ve sıcaklık faktörleri kesişiminin ΔE değerine anlamlı bir seviyede etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. %0,6 oranında termokromik pigment katkısı içeren örme çoraplarda olduğu gibi, en fazla renk değişim yüzdesi 30°C sıcaklıktan 45°C sıcaklığa geçişte belirlenmiştir. En yüksek renk farkının 75°C sıcaklıkta olduğu tespit edilmiştir. 75°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda renk farkının çok fazla etkilenmediği istatistiki analiz ile belirlenmiştir.



Şekil 4.20. J8 kodlu poliester örme çorapların renk farkı değerlerine sıcaklık (solda) ve zaman (sağda) faktörlerinin etkisi

5. SONUÇ

Tekstil sektöründe kullanılan termokromik ürünler genellikle kumaşa baskı, boya, kaplama gibi bitim işlemleri yöntemiyle elde edilmektedir. Bu uygulamaların dışında; polipropilen ve polietilen polimerlerinin yapısına eriyik çekim yöntemi ile eklenerek, termokromik iplik ve kumaş üretilmektedir. Tekstil sektöründe yaklaşık %70 pazar payı olan poliester esaslı tekstil malzemelerinin fonksiyonelliğinin artması önem arz etmektedir. Sıcaklık ile renk değiştiren malzemeler; spor giysilerinde, koruyucu kıyafetlerde, iş kıyafetlerinde, ısı göstergeli giysilerde kullanılmaktadır.

Yapılan çalışmada 33°C sıcaklığın üzerinde renk değiştiren termokromik toz pigment kullanılmıştır. Masterbatch üretiminde kullanılacak olan termokromik tozun, parçacık boyutu analizi yapılmış ve eriyik çekim yönteminde kullanılmaya uygun olduğu tespit edilmiştir. İlk aşamada %20 oranında termokromik pigment ile %80 oranında düşük sıcaklıkta eriyen poliester polimeri kullanılarak masterbatchler üretilmiştir. Eriyik çekim yöntemiyle poliester polimeri içerisine termokromik pigment katkılı masterbatchler eklenerek lif çekimi gerçekleşmiştir. Eriyik çekim yönteminde termokromik katkı içermeyen ve %0,6, %1 ve %1,6 oranlarda termokromik pigment içeren LOY iplikler üretilmiştir. Yarı mamül olan LOY ipliklere çekim işlemi uygulanarak FDY iplikler (nihai iplik) üretilmiştir. Çalışmada üretilen FDY ipliklerden örme çorap yapılmıştır. Termokromik toz pigmente, poliester cipslere ve FDY ipliklere, DSC, FTIR, SEM ve TGA analizleri uygulanmıştır. Yapılan test ve analizler doğrultusunda; kullanılan termokromik toz pigmentin düşük sıcaklıkta eriyen poliester cips ile uyumlu olduğu, eriyik çekim çalışma sıcaklığının poliester ve termokromik pigment ile çalışılabilir olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca termokromik masterbatchin iplik içerisinde var olduğu ve termokromik masterbatch oranı arttıkça iplik içerisindeki termokromik pigment oranın da arttığı görülmüştür. Termokromik katkılı ipliklerden örme çorap üretilebildiği ve örme çorapların belirlenen sıcaklık ile etkileşimi sonucunda renk değiştirdiğinin tespiti yapılmıştır. Yapılan nem analizi sonucunda hem poliester cipsin hem de termokromik masterbatchin nem oranının, eriyik çekim yöntemi için uygun olduğu tespit edilmiştir.

Katkısız ve termokromik pigment katkılı örme çoraplar 30°C, 45°C, 60°C, 75°C, 90°C ve 120°C sıcaklıklardaki etüv içerisinde; 1 dakika, 3 dakika ve 5 dakika sürelerde bekletilmiş ve örme çorapların bu şartlarda renk değişimleri spektrofotometre ile ölçülmüştür. Spektrofotometre ölçüm sonucunda, sıcaklık etkisiyle örme çoraplar mavi renkten beyaz renge doğru renk değiştirmiştir. Termokromik katkılı örme çorapların, 30°C sıcaklığı hariç, uygulanan tüm sıcaklıklarda; ΔE değerinin 1'den büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu bilgiler ışığında, örme çorapların sıcaklık değişimine bağlı olarak renk değişimi gözlemlenmiştir. Ayrıca haslık değerlendirilmesi sonucunda örme çorapların yıkamaya ve sürtmeye karşı rengini koruduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak; %1,6 oranında termokromik pigment katkısı örme çorabın renginin diğer katkılı kumaşlara göre daha koyu mavi olduğu sıcaklık etkisiyle renk değişiminin göz ile de görülebilir seviyede olduğu belirlenmiştir. Çalışmada üretilen termokromik ipliğin, sağlık sektöründe vücut termometresi olarak kullanılabileceği önerilmektedir.

Kullanılan termokromik katkılı ipliklerden dokuma kumaş veya farklı tasarımda örme kumaşlar üretilerek sıcaklık ile renk değişimleri incelenebilir. Ayrıca termokromik pigment katkılı iplikler; POY iplik kalitesinde üretildikten sonra yalancı büküm tekstüre veya hava jetli tekstüre yöntemiyle de üretilebilir. Endüstriyel makinede ve tek bir dozajda, daha uzun süreli çalışılarak; ipliklerin fiziksel ve mekaniksel performansı incelenebilir.

KAYNAKLAR

Agarwal, A., Raheja, A., Natarajan, T. S., & Chandra, T. S. (2012). Development of universal pH sensing electrospun nanofibers. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *161*(1), 1097-1101.

Aitken D, Burkinshaw SM, Griffiths J, Towns AD. Textile applications of thermochromic systems. Review of Progress in Coloration. 1996; 26: 1–8.

Akçam, O. (2011). *Katkılı poliester filamentlerinden kumaş üretimi ve özellikleri* (Doctoral dissertation, Bursa Uludag University (Turkey)).

Altınok, U. B. (2008). *Tekstil yüzeylerinin antibakteriyel özelliklerinin araştırılması* (Doctoral dissertation, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü).

Bamfield P. Chromic Phenomena: Technological Applications of Colour Chemistry. London, The Royal Society of Chemistry; 2001, 1-41.

Bamfield P. Chromic Phenomena: Tecnological Applications of Colour Chemistry. Royal Society of Chemistry; 2001. 305-314.

Bamfield P. Chromic Phenomena: Technological Applications of Color Chemistry. Journal of the American Chemical Society 2002; 124 (46): 13960– 13960

Başer, İ. (1998). Tekstil teknolojisi. *Marmara Üniversitesi Yayınları*, (634).

Becerir, B. (2023). *Endüstriyel renk fiziği ve tekstil uygulamaları.* Medyay.

Bouas-Laurent, H., & Dürr, H. (2001). *Organic photochromism (IUPAC technical report)*. Pure and Applied Chemistry, 73(4), 639-665.

Bozkurt, G. (2007). Fotokromik Bileşiklerin Sentezi ve Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans, Çukurova Üniversitesi. *Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana*.

Burkinshaw SM, Griffiths J, Towns AD. Colour Science ’98. University of Leeds, Department of Colour Chemistry; 1999. 174-183.

Buscio V., Crespi M., and Gutiérrez-Bouzán C., 2014. A Critical Comparison Of Methods For The Analysis Of indigo İn Dyeing Liquors And Effluents, Materials (Basel)., Vol. 7, No. 9, pp. 6184–6193.

Christie RM, Bryant ID. The application of instrumental colour measurement methods to thermochromic printing inks. Surface coatings international. 1995; 78: 332–336.

Christie RM, Bryant ID. An evaluation of thermochromic prints based on microencapsulated liquid crystals using variable temperature colour measurement. Coloration Technology. 2005 121 (4): 187–192.

Cook, J. (1968). The elastic constants of an isotropic matrix reinforced with imperfectly oriented fibres. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *1*(6), 799.

Coşkun, E., & Oğulata, R. T. (2007). *Akıllı tekstiller ve genel özellikleri*. Çukurova Üniversitesi Fen Bi.

Çirkin, S. (2006). *Yalancı büküm tekstüre işleminde tekstüre değişkenlerinin iplik özellikleri üzerindeki etkisi* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Çorapçı, A. (2023). *UV Işınlarına Karşı Koruma Özelliği Gösteren Poliester Iplik Üretimi, Karakterizasyonu ve Iplik Özelliklerinin bazı Kumaş Performans Özelliklerine Etkilerinin Incelenmesi* (Doctoral dissertation, Bursa Uludag University (Turkey)).

Demir, A., & Behery, H. M. (2006). *Sentetik Filament İplik Üretim ve Tekstüre Teknolojileri*. yy.

Demir, L., & Mutlu, Ö. (2005). Tekstil terbiyesinde uygulanan art işlemlerin kuru sürtme hasliği üzerindeki etkisinin istatistiksel deney tasarimi yöntemi ile belirlenmesi. *Tekstil ve Mühendis*, *12*(57), 39-49.

De Smet, D., & Vanneste, M. (2019). Responsive textile coatings. In *Smart Textile Coatings and Laminates* (pp. 237-261). Woodhead Publishing.

Devarayan, K., & Kim, B. S. (2015). Reversible and universal pH sensing cellulose nanofibers for health monitor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *209*, 281-286.

Di Nunzio MR, Gentili PL, Romani A, Favaro G. Photochromism and Thermochromism of some Spirooxazines and Naphthopyrans in the Solid State and in Polymeric Film. The Journal of Physical Chemistry 2010; 114 (13): 6123– 6131.

Egeli, D. *Akıllı tekstil uygulamalarına yönelik sensör özellikli kumaş yüzeyi geliştirilmesi* (Master's thesis, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).

Erdik, E., & Yöntemler, O. K. S. (1993). Gazi Büro Kitabevi: Ankara.

Erdoğan, K., & ŞAHİNBAŞKAN, T. (2008). Renk yönetiminde kullanılan standart ICC profillerinin Türkiye'de oluşturulmuş bazı profiller ile karşılaştırılması. *Politeknik Dergisi*, *11*(4), 365-371.

Erol, A. D., & Çetiner, S. (2017). Giyilebilir Elektronik/Akıllı Tekstiller ve Uygulamaları. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *20*(1), 1-20.

Ferrara, M., Bengisu, M., Ferrara, M., & Bengisu, M. (2014). *Materials that change color* (pp. 9-60). Springer International Publishing.

Gupta, B. S., & Edwards, J. V. (2019). *Textile materials and structures for topical management of wounds. In Advanced textiles for wound care (pp. 55-104)*. Woodhead Publishing.

Gupta, V. B., Mondal, S. A., & Bhuvanesh*, Y. C. (1997). Spinning speed–throughput rate relationships for polyester, nylon, and polypropylene fibers. *Journal of applied polymer science*, *65*(9), 1773-1788.

Hardy, D. V. N. (1948). Polyethylene terephthalate and its early development. *Journal of the Society of Chemical Industry*, *67*(11), 426-432.

Hegde, R. R., Dahiya, A., Kamath, M. G., Kotra, R., & Gao, X. (2004). Polyester fibers. *University of Tennessee*.

Hockenberger, A. (2004). *Tekstil fiziği*. Alfa.

Ibrahim, W. (2012). *An investigation into textile applications of thermochromic pigments* (Doctoral dissertation, Heriot-Watt University).

ISO/CIE 11664-4:2019 Colorimetry — Part 4: CIE 1976 L*a*b* colour space

Jaffe, M., Easts, A. J., & Feng, X. (2020). Polyester fibers. In *Thermal analysis of textiles and fibers* (pp. 133-149). Woodhead Publishing.

Kadolph, S.J. 2007. Textiles. Pearson Prentice Hall., United Kingdom. 496 pp

Karlessi, T., & Santamouris, M. (2015). Improving the performance of thermochromic coatings with the use of UV and optical filters tested under accelerated aging conditions. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, *10*(1), 45-61.

Khattab, T. A. (2020). From chromic switchable hydrazones to smart materials. *Materials Chemistry and Physics*, *254*, 123456.

Khattab, T. A., & Abdelrahman, M. S. (2020). From smart materials to chromic textiles. *Advances in functional finishing of textiles*, 257-274.

Khattab, T. A., Tiu, B. D. B., Adas, S., Bunge, S. D., & Advincula, R. C. (2016). Solvatochromic, thermochromic and pH-sensory DCDHF-hydrazone molecular switch: response to alkaline analytes. *RSC advances*, *6*(104), 102296-102305.

Khattab, T. A., Rehan, M., Aly, S. A., Hamouda, T., Haggag, K. M., & Klapötke, T. M. (2017). Fabrication of PAN-TCF-hydrazone nanofibers by solution blowing spinning technique: Naked-eye colorimetric sensor. *Journal of environmental chemical engineering*, *5*(3), 2515-2523.

Kim S, Suh H, Cui J, Gal Y, Jin S, Koh K. Crystalline-state photochromism and thermochromism of new spiroxazine. Dyes and Pigments 2002; 53 (3): 251–256.

Kirstein, T. (Ed.). (2013). *Multidisciplinary know-how for smart-textiles developers*. Elsevier.- The future of smart- textiles development: new enabling technologies, commercialization and market trends (s 1-25)

Kristal ile izotropik sıvı faz arasındaki sıcaklığa bağlı geçiş ve moleküllerin yönelimi [http://www.chemical-engineering.co/2011/12/13/liquid-crystals/; Emek, 2007]

Koncar, V. (Ed.). (2016). *Smart textiles and their applications*. Woodhead Publishing.

Kooroshnia, M. (2013). Demonstrating color transitions of leuco dye-based thermochromic inks as a teaching approach in textile and fashion design. *Nordes, 1*(5).

Kooroshnia, M. (2013). Leuco dye-based thermochromic inks: recipes as a guide for designing textile surfaces. In *13th AUTEX World Textile Conference, Dresden Germany*. AUTEX World Textile Conference.

Kozanoğlu, G. S. (2006). *Elektrospinning yöntemiyle nanolif üretim teknolojisi* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Leclerc, M. (1999). Optical and electrochemical transducers based on functionalized conjugated polymers. *Advanced Materials, 11*(18), 1491-1498.

Lee, W., & Someya, T. (2019). Emerging trends in flexible active multielectrode arrays. *Chemistry of Materials, 31*(17), 6347-6358.

Lin, C. A. (2008). Manufacture of polyester fibres. In *Polyesters and Polyamides* (pp. 62-96). Woodhead Publishing.

Maleki, L. (2013). How to get changing patterns on a textile surface by using thermo chromic pigments and an inherently conductive polymer. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Sweden: Boras Textile School.

Mather, R. R. (2001). Intelligent textiles. *Review of Progress in Coloration and related Topics, 31*, 36-41.

Mečņika, V., Hoerr, M., Krieviņš, I., & Schwarz, A. (2014). Smart textiles for healthcare: applications and technologies. Rural Environment, Education, Personality, 7, 150-161.

Mehta, A., Gaur, U., & Wunderlich, B. (1978). Equilibrium melting parameters of poly (ethylene terephthalate). *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition*, *16*(2), 289-296.

Meredith, R. (1975). The structures and properties of fibres. *Textile Progress*, *7*(4), 1-74.

Meriç, D. Akıllı Tekstillerin Ürün Tasarımında Kullanım Olanakları ve Moda Tasarımına Yönelik Uygulamalar.

Militky, J. (2009). The chemistry, manufacture and tensile behaviour of polyester fibers. In *Handbook of tensile properties of textile and technical fibres* (pp. 223-314). Woodhead Publishing.
Moncrieff, R.W. 1970. Man-made fibers. London: Heywood Books.

Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., & Ragadhita, R. (2019). How to read and interpret FTIR spectroscope of organic material. *Indonesian Journal of Science and Technology*, *4*(1), 97-118.

Norstebo, C. A. (2003). *Intelligent textiles, soft products*. Journal of Future Materials, 1-14.

Pakolpakçil, A. (2013). *Akıllı tekstillerde kullanılmak üzere halokromik boyalarla boyanmış poliamid 6, 6 kumaşın yaş haslıklarının incelenmesi* (Master's thesis, Namık Kemal Üniversitesi).

Pakolpakçıl, A. (2020). *Doğal pH Indikatörleri Içeren Sodyum Alginat/Polivinil Alkol Esaslı Akıllı Nanolifli Yara Örtüsü Üretimi ve Değerlendirilmesi* (Doctoral dissertation, Bursa Uludag University (Turkey)).

Pérez, G., Mota-Heredia, C., Sánchez-García, J. A., & Guerrero, A. (2020). Compatibility between thermochromic pigments and Portland cement-based materials. *Construction and Building Materials*, *251*, 119038.

Rajadurai, R. S., & Lee, J. H. (2020). High temperature sensing and detection for cementitious materials using manganese violet pigment. *Materials*, *13*(4), 993.

Rangkupan, R. (2002). *Electrospinning process of polymer melts*. The University of Akron.

Sen AK. Coated Textiles: Principles and Applications. 2nd edition. CRC Press; 2007. 187-188

Seventekin, N. (2003). Kimyasal Tekstil Muayeneleri. *Ege Üniversitesi Tekstil ve Konsfeksiyon Araştırma ve Uygulama Merkezi Yayını, Yayın*, (35), 2.
Sharma, A. (2018). *Understanding color management*. John Wiley & Sons.

Sichina, W. J. (2000). DSC as problem solving tool: measurement of percent crystallinity of thermoplastics. *Perkin Elmer Instruments, and PETech*, *40*.

Skoog, D. A., Holler, F. J., West, M. D., & Crouch, S. R. (2004). Analitik Kimya Temel İlkeleri, 8. *Baskı, Bilim Yayıncılık, Ankara*.

Smith, B. C. (2018). *Infrared spectral interpretation: a systematic approach*. CRC press.

Štaffová, M., Kučera, F., Tocháček, J., Dzik, P., Ondreáš, F., & Jančář, J. (2021). Insight into color change of reversible thermochromic systems and their incorporation into textile coating. *Journal of Applied Polymer Science*, *138*(4), 49724.

Stylios, G. K., & Wan, T. (2007). Shape memory training for smart fabrics. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, *29*(3-4), 321-336.

Şefkat, B. 2005. Bir poliester üretim tesisinde üretim parametrelerinin modül üzerine etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa. (Yayınlanmamış)

Talvenmaa, P. (2006). Introduction to chromic materials. In H. Mattila (Ed.), *Intelligent textiles and clothing. Woodhed Puhlishing in Textiles* (pp. 193-205)

Temel, F. (2017). *Günümüzde teknik ve akıllı tekstil uygulamaları* (Master's thesis, Güzel Sanatlar Enstitüsü).

Tilley RJD. Colour and Optical properties of Materials. 2nd edition. John Wiley & Sons Ltd.; 2011.

Owen, G. (2011). Corporate strategy and national institutions: the case of the man-made fibres industry. *Capitalism and Society*, *6*(1).

Özcan, A. (2008). Kağıt yüzey pürüzlülüğünün L* a* b* değerleri üzerine etkisinin belirlenmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *7*(14), 53-61.

Ural, N. (2012). *Akıllı tekstiller ve günümüzde kullanım olanakları* (Master's thesis, Güzel Sanatlar Enstitüsü).

Van den Kirboom, E., & Byluppala, M. R. (2011). *Systex-Coordination Action for Enhancing the Breakthrough of Intelligent Textile Systems (E-textiles and Wearable Microsystems)* (Vol. 6). Systex FP7-ICT-207.3.

Van der Schueren, L., & De Clerck, K. (2010). The use of pH-indicator dyes for pH-sensitive textile materials. *Textile research journal*, *80*(7), 590-603.

Wang, W., Wang, G. P., Zhang, W., & Zhang, D. (2018). Reversible thermochromic response based on photonic crystal structure in butterfly wing. *Nanophotonics*, *7*(1), 217-227.

Waseem, I. (2012). An Investigation into Textile Applications of Thermochromic Pigments. *Edinburgh, Scotland*.

White, M. A., & LeBlanc, M. (1999). Thermochromism in commercial products. *Journal of chemical education*, *76*(9), 1201.

Yakartepe, M. (1995). *Tekstil terbiye teknolojisi: kasar'dan apreye*. TKAM.

Yan J, Jiao M, Rao L, Wu S-T. Experimental demonstration of tunable phase in a thermochromic infrared-reflectarray metamaterial. Optics Express. 2010; 18 (2): 1330–1335.

Yan, X., & Chang, Y. (2019). Investigation of waterborne thermochromic topcoat film with color-changing microcapsules on Chinese fir surface. *Progress in Organic Coatings*, *136*, 105262.

Yılmaz, B. (2007). *Termokromik özellik gösteren polivinil alkol bazlı jel ve filmlerin uv ve empedans spektroskopisi yöntemleriyle incelenmesi* (Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi) Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara).

01.12.2023 tarihinde https://www.sigmaaldrich.com adresinden erişildi.