



Researches on Multidisciplinary Approaches

Multidiscipliner Akademik Yaklaşım Araştırmaları 2023, 3(1): 50-63

Yayına Geliş Tarihi / Article Arrival Date

02.03.2023

Yayıma Kabul Tarihi / Date of Acceptance

30.03.2023

Tekstil Sektöründe Su Tüketimi ve Geliştirilen Susuz Boyama Yöntemleri

Derleme Makalesi

Ahmet Burak Kavlakoğlu / Doktora Öğrencisi 

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Kimya Mühendisliği Bölümü, burakkavlakoglu@yahoo.com

Yahya Baş / Araş. Gör. 

İstanbul Üniversitesi, Kimya Bölümü, yahyabas@istanbul.edu.tr

Gülsüm Yalçın Kavlakoğlu 

SML Seamless San. Tic. Şti. Ltd., gulsum.kavlakoglu@sml.com.tr

Yavuz Selim Aşçı / Doç. Dr. 

İstanbul Üniversitesi, Kimya Bölümü, sasci@istanbul.edu.tr

Özet

Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin etkileri gün geçtikçe daha fazla günlük hayatımızı etkilemeye başlamıştır. Bu durumun en önemli sonuçlarından birisinin insanların ihtiyaç duyduğu nitelikte suya ulaşımında yaşanan sorunlar olduğu söylenebilir. Su, canlılığın devamı için pek çok noktada vazgeçilmezdir. Ancak mümkün olduğunca kullanımı azaltacak yeni yöntemler geliştirilerek ve var olan kaynakların korunmasını sağlayarak sorunun kontrol altında tutulması gereklidir. Tekstil endüstrisi, tatlı su tüketimi ve kirliliğinde büyük bir paya sahiptir. Bu nedenle durum tekstil endüstrisinin, su tüketimini ve buna bağlı atık tehlikelerini gözden geçirmeye, yeniden yapılandırmaya ve azaltmaya zorlamaktadır. Tekstil yaş işleme aşamaları incelendiğinde boyama prosesleri'nin su tüketiminin yoğun olduğu basamaklarından birisi olduğu görülmektedir. Bu çerçevede son yıllarda boyama aşamasında su tüketimini azaltacak veya susuz boyama yapabilecek yeni yöntemler üzerine çalışmalar sürdürülmektedir. Bu süreç içinde süperkritik karbondioksit kullanarak susuz boyama yapılan yöntem gibi bazı ticari prosesler de geliştirilmiş ve kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu çalışma da su yerine alternatif çözümler kullanılarak yapılan boyama yöntemi araştırmaları derlenmiştir.

Anahatar Kelimeler: Tekstil, Susuz Boyama, Sürdürülebilir Teknolojiler.

JEL Kodları: O44, Q25, O33, L67.

Water Consumption and Developed Waterless Dyeing Methods in the Textile Industry

Abstract

The effects of global warming and climate changes have begun to affect our daily lives more and more, as days pass. It can be said that Some of the most commonly encountered problems due to these facts are experienced in reaching the quality water that people need. Water is indispensable at many points for the continuation of life. However, it is necessary to keep the problem under control by developing new water saving methods and by protecting the existing resources. The textile industry has a large share in the consumption and pollution of the fresh water. Therefore, the textile industry is forced to review, restructure and reduce water consumption and the associated waste hazards. When the textile wet processing stages are examined, it is seen that the dyeing processes are one of the stages where water consumption is intense. In this context, studies on new methods that will reduce water consumption during dyeing or dyeing without water have been carried out in recent years. In this process, some commercial processes such as waterless dyeing using supercritical carbon dioxide have been developed and its use has become widespread. In this study, researches on dyeing methods using alternative solvents instead of water were compiled.

Keywords: Textile, Waterless Dyeing, Sustainable Technologies.

JEL Codes: O44, Q25, O33, L67.

Giriş

Medeniyetin ilerleyişi ve endüstriyel-teknolojik gelişkinliğine paralel olarak insanlık, tarihin hiçbir döneminde görülmemiş doğa felaketleriyle karşı karşıya kalmanın eşiğindedir. Geçtiğimiz yirmi yılda sıkça dile getirilen küresel ısınma ve iklim değişikliği, bugün yerlerini aslında bu olayların bir sonucu niteliğinde olan çok daha net ve tehlikeli bir probleme bırakmış durumdadır: kullanılabilir su kaynaklarının kıtlığı.

Dahası, kontrolsüz ekonomik faaliyetlerden kaynaklı küresel ısınmanın yanı sıra, dünyada temiz su tüketimi de nüfus ve bilinçsiz kullanıma bağlı olarak katlanarak artmaktadır. 2021 yılı AQUASTAT istatistiklerine göre, dünya çapında tatlı su tüketimi 1900 yılından bu yana, yıllık bazda 6,47 kat artış göstermiştir (AQUASTAT, 2021). 2017 yılı verilerine göre, dünyada tatlı su tüketiminde başı %64,5 oranı ile Asya kıtası ülkeleri çekerken, toplamda yıllık 2505 km³'lük tüketimin %81,36'sının tarım faaliyetlerinden ileri geldiği belirtilmiştir. Su tüketiminin en yüksek olduğu ikinci kıta olan Kuzey Amerika'da ise (602 km³/yıl) dikkat çeken bir başka kullanım söz konusudur: endüstriyel temiz su kullanımı.

Gelişmiş ülkeleri barındıran Kuzey Amerika'da endüstriyel kullanım, toplam tatlı su kullanımında %41,4 ile ikinci sırada yer alırken, Avrupa'da bu kullanım oranı % 46,57 ile birinci sırada yer almaktadır. Bu problem, yıllık tatlı su yenilenme oranlarında sırasıyla % 8,8 ve % 4,2 ile son iki sırada yer alan bu iki kıta için ciddi tehlike arz etmektedir.

UNESCO'nun 2009 tarihli raporuna göre, tarım dünyada su tüketiminde % 70'lik payla başı çekerken, ikinci sırada %22'lik tüketimle tekstil endüstrisi yer almaktadır (UNESCO, 2009). İçeriğindeki kimyasallar ile deşarj suları ciddi bir kirliliğe neden olduğu gibi, yüksek miktarlarda temiz su tüketimiyle tekstil, yoğun su kullanan endüstrilerin başını çekmektedir. Dünyanın en büyük ihracat ekonomisi olan Çin'de 2014 yılında tekstil kaynaklı su tüketiminin 59 milyar m³, ikinci en büyük ihracat ekonomisi olan AB'de ise bu tüketimin yıllık 600 milyon m³ olarak gerçekleştiği ifade edilmektedir (WTO, 2015). Bu kullanım, üretimin çeşitli aşamalarında su kullanımına gereksinim duyulmasından kaynaklanmaktadır. İstatistiklere göre tek bir pamuk gömleği imal ederken 2700 litre, bir kot pantolonu imal etmek için ise 7500 litre su tüketilmektedir (Aivazidou ve Tsolakis, 2019). Bu miktar, ortalama bir insanın 2,5 yıllık içme suyuna eşdeğer bir miktardır. Gelişen bir ekonomi olan ülkemizde de hızlı endüstriyel gelişime paralel olarak doğal kaynakların tüketimi de ivme kazanmıştır. Türkiye Su Raporu'na göre 1990 yılından 2008 yılına,

endüstriyel su kullanımı % 50,2 artış göstermiştir (Alkaya ve Demirer, 2015). 2030 yılında bu tüketimin, 22 milyar m³'e erişerek, tarımsal ve evsel su kullanımını dahi geride bırakacağı ön görülmektedir. Su tüketiminin Türkiye'deki endüstri kolları içerisinde su tüketimi ve deşarj su miktarı bakımından, basit metaller üretiminden sonra ikinci sırada geldiği raporlanmıştır. TÜİK rakamlarına göre 2008 yılında ülkemizin yıllık endüstriyel su tüketiminin % 15'i 191,5 milyon m³ ile tekstil sektöründe gerçekleşmiştir. 2023 yılında tekstil endüstrisi su tüketiminin 623,7 milyon m³'e ulaşacağı öngörülmektedir (Restiani vd, 2016).

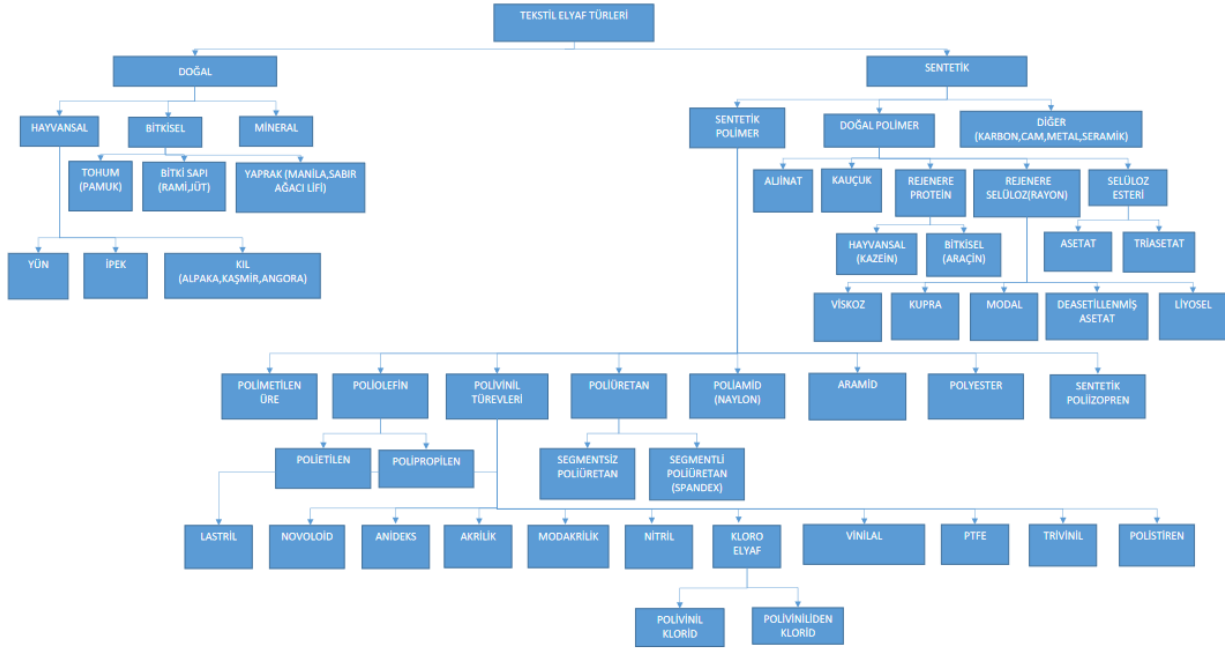
Temiz su tüketiminin yanı sıra, tekstil endüstrisi atık su deşarjı ile tabii su kaynaklarının kirlenmesi bakımından da tehlike arz etmektedir. Tekstil endüstrisinin, dünyadaki tüm atık suların % 20'sinden tek başına mesul olduğu ifade edilmektedir (Fane ve Wastl, 2022). Bununla birlikte, Birleşmiş Milletler'in (BM) 2017 tarihli su raporunda, dünyada atık suların %80'inin herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan tabiata bırakıldığını ortaya konmuştur (UNESCO, 2017). Tekstil proseslerinde kullanılarak atık sulara karışan boyama, ağartma ve yıkama kimyasalları, doğal su kaynaklarının çok ciddi biçimde kirlenmesine neden olmaktadır (Wang vd, 2013; de Brito vd, 2008). Türkiye'de de tekstil atık suları karakterizasyonuna sonucunda, bu atık suların İSKİ tarafından belirlenmiş kirlenme kriterleri olan kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam askıda katı, toplam kükürt, sülfat ve yağ ve makine yağı limitlerinin tümünde limitin üzerinde olduğu ortaya çıkmıştır. Buna rağmen ülkemizde, tekstil ve deri sektörlerinde faaliyet gösteren işletmelerin yalnızca %12'si kendi atık su filtreleme tesisine sahiptir (Restiani vd, 2016). Bu bakımdan son yıllarda, global su kirliliğinin çok ciddi bir kısmından mesul olan tekstilde (Shen, 2014) sürdürülebilirlik kritik öneme sahip hale gelmiştir (Boström ve Micheletti, 2016).

Tekstil endüstrisi ve suyun bulunduğu materyale genel anlamda 'elyaf' denilebilir. Elyafın tekstil ve giyimde uygulanması, insan evriminin gelişmesinden başlar. Giyim, estetik veya süs amaçlı değil; soğuğa, sıcağa, yağmura, toza vb. karşı korunmak için var olmuştur. Elyafın giyimde uygulanması, kenevir, keten, pamuk, ipek ve daha sonra ipekböcekçiliğinin kullanılmasıyla MÖ 5000-4500'e kadar uzanır. Sanayi Devrimi'ne kadar tüm lif kaynağı doğadandı. 18. ve 19. yüzyıllar, elyaf işleme ve uygulama makineleri ile birlikte bir sanayi devrimi çağına tanık oldu. Kademeli olarak suni ipek gibi rejenere elyafların ve daha sonra naylon ve poliester gibi sentetik elyafların piyasaya sürülmesiyle, doğal elyafların tekeli azaldı. Aynı zamanda yeni ve benzersiz elyaflar ve elyaf geliştirme için bir rekabet ortamı oluşturmuştur (Mishra, 2016).

Rejenere ve sentetik elyaf kavramı, yeni türler geliştirmek için yapılan araştırma faaliyetlerine yeni bir boyut getirmiştir. Kimyasal davranış ve yapının, yapısal hizalamanın, moleküler özelliklerin ve işleme koşullarının değiştirilmesi ile farklı elyaf türlerinin elde edilmesi ve geri dönüşümünün gerçekleştirilebilmesi yaygınlaşmıştır. Bu sayede günümüz tekstil endüstrisinde çok farklı tür ve özelliklerde elyaf çeşidi kullanılmaktadır (Sreenivasa Murthy,2018).

Genel olarak tekstil elyafları, doğal elyaf ve sentetik elyaf olmak üzere iki ana grup altında toplanabilir. Bununla birlikte tekstil elyaf türlerinin ayrıntılı sınıflandırılması Şekil 1'de sunulmuştur (Sreenivasa Murthy,2018).

Şekil 1: Tekstil elyaf türlerinin sınıflandırılması.



Kaynak: (Sreenivasa Murthy,2018)

Tekstil elyafı, çeşitli tekstil bitmiş ürün türlerini üretmek için temel hammadDEDİR. Dokuma, örme, dantel, keçe, nonwoven (dokunmamış) vb. uygun bir yöntemle kumaş haline getirilebilen elyafa 'tekstil elyafı' denir (Nawab, 2016; Cassidy ve Goswami, 2017).

İplik veya yukarıdaki yöntemlerle kumaş haline dönüştürülen elyaf, farklı boya grupları ve boyama yöntemleri kullanılarak renklendirilir. Elyafa, ipliğe veya kumaşa renk uygulama işlemine 'boyama' denir (Hussain ve Wahab, 2018).

Boyama işleminde kullanılan boyar maddeler, bitkisel, hayvansal veya sentetik elyaf üzerinde ancak bunlara afiniteleri varsa kullanılabilir. Tekstil boyaları, esas olarak yün, ipek ve naylonun boyanmasında kullanılan asit boyaları ve selüloz elyaf türleri için güçlü bir afiniteye sahip olan direkt boyaları içerir. Mordan boyalar, boyanacak malzemeye afinite kazandırmak için tuz gibi kimyasal maddelerin eklenmesini gerektirir. Selüloz liflerine, yüne veya ipeğe, metal tuzları ile muamele edildikten sonra uygulanırlar. Selülozu boyamak için kullanılan kükürt boyaları ucuzdur, ancak parlaklıktan yoksun renkler üretir. Azoik boyalar aromatik amin esaslı olarak üretilen, kromofor olarak -N=N- (azo) grubu içeren boyarmaddelerdir. Suda çözünmedikleri için bir bağlama bileşiği ve ardından diazotize edilmiş bir baz ile dolgu yapılarak boyama işlemlerinde kullanılır hale getirilir. Dispers boyalar, poliesterler, naylon ve selüloz asetatlar gibi hidrofobik lifleri boyamak için kullanılan ince bölünmüş, çözünmez, organik pigmentlerin süspansiyonlarıdır. Reaktif boyalar doğrudan elyafı birleşerek mükemmel renk haslığı sağladıkları için yaygın olarak kullanılmaktadır (Nawab, 2016).

Kullanılan boyar madde türüne göre çeşitli boyama yöntemleri uygulanmaktadır. Bu boyama yöntemlerinin ortak yönü neredeyse tamamının boyaların sulu çözeltileri hazırlanarak gerçekleştirilmesidir. Suyun önemi ve artan değeri nedeniyle son yıllarda susuz boyama yöntemleri üzerine yoğun araştırmalar sürdürülmektedir.

Susuz Boyama Yöntemleri

Misel Boyama

Kongliang Xie ve diğ., tarafından misel boyamanın geleneksel boyama işlemine evre dostu bir alternatif olduğu bildirilmiştir. Boya misel solüsyonu kullanılarak reaktif boyama 1:5 flotte oranında gerçekleştirilmiştir. Kontrol numunesi geleneksel 1:15 flotte oranında boyanmıştır. Düşük flotte oranında misel ile boyanmış kumaşın özellikleri konvansiyonel olarak boyanmış numune ile karşılaştırılmıştır. Boya ekme, fiksasyon, reaktivite ve yıkama, ıslak çatlama, ter haslığı gibi haslık özelliklerinin geleneksel olarak boyanmış kumaşla karşılaştırılabilir olduğu bulunmuştur. Boyama sırasında %60 su tasarrufu, %50 buhar tasarrufu, %60 elektrolit tasarrufu bildirilmiştir (Xie vd, 2011).

Sıvı parafin Banyosunda Boyama

Suxin Xu ve diğerleri, her çözücünün hem boya alımını hem de fizikokimyasal özelliklerini göz önünde bulundurarak 110 organik çözücüden susuz boyama ortamı için sıvı parafini seçmiştir. Polietilenteraftalat (PET) kumaş, sıvı parafin ortamı kullanılarak boyanmıştır. Likit Parafin boyama sonuçları bu parametrelerden etkilenmediği için herhangi bir yardımcı madde kullanmamışlar ve boya banyosunun pH'ını ayarlamamışlardır. 130°C boyama sıcaklığı kullanılmıştır. Klorlu çözücülerle karşılaştırıldığında, sıvı parafin daha yüksek boya alımı ve daha iyi fizikokimyasal özellikleri sağlar. Ayrıca süperkritik CO₂ boyama için gerekli olan pahalı yüksek basınçlı ekipman gerektirmez. Çözücünün 7 kez tekrar kullanılmasından sonra bile mkemmek renk tutarlılığını bildirmişlerdir ve yüzey oligomer içeriği de %0,02'ye dşrlmştir. Parafinle boyanmış kumaşın haslık özellikleri, renk verimi ve mekanik özellikleri sulu boyalı kumaşa benzer bulunmuştur (Xu vd, 2019). PET kumaşın sıvı parafin ortamında başarılı bir şekilde boyanması, sulu olarak boyanmış ürünlerin karşılaştırılabilir haslık özellikleriyle de rapor edilmiştir (Xu vd, 2015).

Polimerizasyon Aşamasında Boyama

PLA'nın (Polilaktik Asit) polimerizasyonu ve tek adımda eşzamanlı renklendirme, su ve enerji yoğun olan geleneksel PLA boyamaya evre dostu bir alternatiftir. Bu yöntemde, polimerizasyonu hızlandıran ve ayrıca PLA polimerine renk katan katalizör içeren bir kromofor kullanılır. Bu sayede polimerleşme esnasında standart tekstil boyama yöntemlerinden farklı şekilde su kullanmaksızın renklendirme mümkün olmaktadır (Hussain vd, 2015).

Organik zcler Kullanarak Boyama

1971 yılında Gebert, K. boya banyo çözücüsü olarak perklor etilenin etkinliğini incelemiştir. Çalışmada tekstil materyali olarak poliester kumaşlar kullanılmıştır. Kullanılan boyalar Cibacet Scarlet 2B (CI Disperse Red 1), Cibacet Dark Blue RB (CI Disperse Blue 55) ve Navilene Violet 6R (CI Disperse Red 11) olarak seçilmiştir.  dispers boyanın tümü için, sulu ortamdan veya perkloretilen ortamından boyanmış poliester üzerindeki renk tonlarında gözle görülür bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir. Perkloretilen kullanılarak benzer şekilde poliesterin boyandığı bir alışma Shah ve arkadaşı tarafından gerçekleştirilmiştir. Kullanılan alternatif boya banyosu sonucunda; kısa boyama süreleri, yardımcı maddelerden tasarruf, uygun işletme maliyetleri ve daha yüksek üretkenlik elde edilebileceği bildirilmiştir (Gebert, 1971; Shah ve Jain, 1985).

Dekametilsiklopentasiloksanın (D5) boya banyosu çözücüsü olarak kullanıldığı çalışmada Saleem, A.M. ve arkadaşları naylon kumaş boyama üzerine alternatif bir yöntem geliştirmeye çalışmıştır. D5'in naylon elyafın iç kısmına nüfuz etmesini ve elyaf kesitindeki dağılımını analiz etmek için konfokal lazer tarama mikroskobu (CLSM) ve X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) analizi yapılmıştır. Naylon için çözücü boyama ve yıkama prosesinin geliştirilmesi için naylon kumaş D5 zcnnde saf dispers boyalarla boyanmış ve D5 ile herhangi bir proses yardımcı maddesi kullanılmadan yıkanmıştır. Sulu boyama ile

karşılaştırıldığında, boyama ortamı olarak D5 kullanılarak azo ve antrakinon boyalarda renk kuvveti değerlerinin yüzde 30 ve yüzde 43 artış sağlandığı bildirilmiştir (Saleem vd, 2020).

Ötektik Karışımlar Kullanarak Boyama

Son dönem kimya araştırmaları arasında en umut vaat eden çevre dostu çözücülerden birisi derin ötektik çözücüler (DES) olarak adlandırılan ve komponentler arası fiziksel etkileşimler sonucu oluşan karışımlardır.

Bu yeni nesil çözücüler susuz boyama yöntemleri geliştirme konusunda da önemli araştırma alanlarından birisi haline gelmektedir. Son dönem literatürde yapılan çalışmaların sayısı gün geçtikçe artmakla birlikte halen incelenmesi gereken bir alan olduğu söylenebilir. Bu alanda yapılan ilk çalışmalardan birinde; Pawar ve arkadaşları 100% poliester dokuma kumaşların boyanması için üre ve kolin klorür ikili ötektik çözücü karışımı kullanmıştır. DES ile boyanmış poliester kumaşların yıkama ve ışık haslığı değerlerinin kabul edilebilir düzeyde ve süblimasyon haslığı değerlerinin geleneksel olarak boyanmış poliesterden daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca boyama işlemi sonrasında yapılan X-Işını Difraktometre (XRD) analizleri ile poliesterin yapısını bozmadığı gösterilmiştir (Pawar ve Adivarekar, 2021).

Pawar ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, poliester boyamada su tüketimini azaltmak için kolin klorür, üre ve gliserin kullanılarak çevre dostu gliserin bazlı derin ötektik çözücü (DES) hazırlanmıştır. Boyama ortamı olarak DES kullanımıyla poliesterin boyanması için zaman, sıcaklık ve pH gibi boyama parametreleri optimize edilmiştir. Konvansiyonel boyalı poliester ile karşılaştırıldığında, genel boyama performansının, poliesterin gerilme mukavemetini etkilemeden daha iyi olduğu , çözücü ile boyanmış poliesterin termal stabilitesinin sulu boyalı poliesterle kıyasla iyileştiği bulunmuştur. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, poliester boyama ortamı olarak DES'in yeşil bir yaklaşım olabileceğini düşündürmektedir (Pawar vd, 2019).

Polimerik nanoliflerinin alternatif çözücüler kullanılarak susuz boyanması fikri 2021 yılında Hussain ve arkadaşları tarafından önerilmiştir. Bunun için su içermeyen bir boyama ortamı geliştirmek amacıyla nanoliflerinin boyanmasında suya alternatif olarak iki farklı derin ötektik çözücü (DES) tanıtılmıştır. Bunun için nanoliflerinin estetik özelliklerini geliştirmek için model boya olarak Dispers Red 167 kullanılmıştır. Nanolifleri boyama tekniğinin renk oluşturma özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için geleneksel kesikli boyama ve ultrasonik boyama yöntemleriyle boyama gerçekleştirilmiştir. Çalışmada boyama süresi, sıcaklık ve boya konsantrasyonu gibi boyama koşulları optimize edilmiştir. Sonuçlar, ultrasonik boyama yönteminin geleneksel boyamaya kıyasla elektrik enerjisinde %58 ve termal enerjide %25 tasarruf sağlayabildiğini göstermiştir (Hussain vd, 2021).

Jiang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, yünlü kumaşların boyanması için susuz ortam olarak doğal ve asidik derin ötektik çözücü kullanan, susuz, geri dönüştürülebilir yeni bir boyama prosesi kurulmuştur. İşlem, diğer yardımcı reaktifler olmadan sadece boya ve derin ötektik çözücü kullanılarak tamamlanmıştır. Hazırlanan çözücülerde hidrojen alıcısı olarak kolin klorür ve hidrojen donörü olarak okzalik, malik ve sitrik asitler kullanılmıştır. Asidik derin ötektik çözücülerde boyanmış yün numunelerinin, geleneksel sulu yöntem kullanılarak boyanmış olanlarla karşılaştırıldığında daha yüksek renk kuvvetine, benzer renk haslığına sahip olduğu ve kabul edilebilir mekanik davranış gösterdiği bildirilmiştir (Jiang vd, 2022).

Süperkritik Şartlarda Boyama

Süperkritik akışkan CO₂ ile boyama, belirli sıcaklık ve basınçta geri dönüştürülmüş karbondioksit kullanılarak yapılan, tamamen susuz bir boyama işlemidir.

Süperkritik sıvı, bir maddenin hem sıcaklığı hem de basıncı kritik noktadan (bir maddenin sıvı ve gaz fazlarının ayırt edilmesinin imkânsız hale geldiği nokta) daha yüksek olduğu fazını ifade eder. Bir maddenin bu fazı birçok avantaja sahiptir ve boyama işleminde suyun yerini alabilir. Kritik sıcaklık ve basınca ulaşmak diğer maddelere göre daha kolay olduğundan normalde kullanılan süperkritik sıvı

karbondioksittir (CO₂). Ayrıca karbondioksit de yanıcı değildir, bu nedenle endüstriyel kullanıma uygundur.

Bu yöntemle tekstil malzemesini boyamak için öncelikle malzeme delikli paslanmaz elik bir borunun etrafına sarılmalıdır. Bundan sonra karıştırıcının etrafına otoklav içerisine monte edilmelidir. Kabin dibine boya tozu konur ve aparat muhafaza edilir, gaz halindeki CO₂ ile temizlenir ve n ısıtmaya tabi tutulur. 310°K alışma sıcaklığına ulaştığında CO₂, sabit karıştırma altında seçilen çalışma basıncına izotermal olarak sıkıştırılır. 50 ila 70 dakika boyama süresi boyunca 74 bar'ın üzerindeki basınç korunur ve burada banyo için damlatılır. Daha sonra CO₂ ve fazla boyalar ayrılır ve geri dönüştürülür (Miah vd, 2013). Yönteme ait avantajlar ve dezavantajlar Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1: Süperkritik Şartlarda Boyama yönteminin avantaj ve dezeavantajları.

Avantajları	Dezavantajları
• Renklendirme sırasında suya ihtiyaç yoktur.	• CO ₂ , uygun sıcaklık ve basıncı koruyarak süperkritik sıvı durumuna geçmelidir.
• Karbondioksitin (CO ₂) gaz yapısından dolayı kurutmaya gerek yoktur.	• Yüksek basınç ve sıcaklık gereklidir.
• Su kirliliğini ortadan kaldırarak çevreyi korur.	• Yüksek vasıflı insan gücüne ihtiyaç vardır.
• Kazan ve makine patlama riski yoktur.	• Yatırım maliyeti yüksektir.
• eşitli kalsiyum (Ca) ve magnezyum (Mg) tuzlarının kumaş yüzeyinde leke oluşturma olasılığı yoktur.	• Karmaşık bir boyama işlemidir.
• Yüksek derecede düzgünlükte boyama gerçekleşir.	
• CO ₂ doğal kaynaklardan elde edildiği için boyama prosesinde kolaylıkla geri dönüştürülebilir.	
• CO ₂ toksik değildir.	
• Kısa süre gereklidir.	

Kaynak: (Miah vd, 2013)

Süperkritik CO₂ ile boyama laboratuvar ölçeğinde başarılı olduktan sonra sistem endüstriyel ölçeğe de entegre edilmiştir. Literatür incelendiğinde bu alanda yapılan çalışmaların sayısı artmaya devam etmektedir.

Cid ve arkadaşları pamuğun süperkritik CO₂ ile boyanabilirliğini arttırmak üzerine çalışmışlardır. Çalışmada n işlem ve yardımcı çözücüler olarak farklı çözücülerle deneyler yapılmıştır. n işlem için en iyi çözücü metanol olarak bulunmuştur. Yardımcı zc ve boya taşıyıcı olarak dimetilsülfoksit (DMSO), en yüksek pamuk renklenmesini sağlamıştır. Metanol yardımcı çözücü ve boya taşıyıcı olduğunda fiksasyonda %62'lik bir artış sağlanmıştır. Boyamadan önce boyanın bir çözücü içinde çözülmesi, boyanın pamuk üzerindeki renk kuvvetini büyük ölçüde artırmıştır (Fernandez Cid vd, 2007).

Cardozo-Filho ve arkadaşları Polietilenteraftalat elyafının süperkritik karbondioksit içinde dispers boyalarla boyanması üzerine çalışmışlardır. Süperkritik CO₂'de Disperse Orange 30 boyası ile boyanmış Polietilenteraftalat (PET) liflerinin renk kuvveti ve renk haslığı üzerindeki işletme faktörlerinin etkisini incelemek için merkezi bir nokta ile tamamlanan 2⁴ faktörlü deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Boyama odasına konulan boya ile PET arasındaki sıcaklık, basınç, boyama süresi ve kütle oranının etkileri (oran) dikkate alınmıştır. Halihazırda sunulan sıcaklıklar ve oranlarda basınç açısından optimum durumda renk Őiddetinin ek kinetik sonuçları elde edilmiştir. Araştırılan tüm faktörlerin renk üzerinde önemli bir istatistiksel etkisi gözlenmiştir. Boya için çözücü olarak süperkritik CO₂ kullanımının, PET elyaflarının Disperse Orange 30 boyası ile boyanması için hızlı ve güvenilir bir alternatif prosedür olduğunu ortaya konulmuştur. Halihazırda elde edilen yıkama haslığı sonuçları süperkritik CO₂ kullanımını desteklemektedir (Cardozo-Filho vd, 2014).

Saus ve arkadaşları Polietilenteraftalat ve diğer sentetik malzemelerin süperkritik CO₂ ile boyanması, boya alımını ve düzgünlüğünü etkileyen faktörler üzerinde çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucu çıkan verilere göre endüstriyel ekstraksiyon teknolojisinden elde edilen deneyimler, bu konudaki ticari boyama

tesislerinin gerçekleştirilmesini artıracaktır. Yüksek yatırım maliyetleri, ekolojik ve işleme süresi kazançları ile dengelenecektir. Zaman içerisinde boya üreticileri, bu yeni prosedüre en uygun malzemeleri tedarik etmek için boya maddesi ayırma işlemlerini uyarlamak zorunda kalacaklardır (Saus vd, 1993).

Gebert ve arkadaşları doğal elyafların süperkritik karbon dioksitte dispers boyalarla boyanması üzerinde çalışma yapmışlardır. Çalışmada ön işlemden geçirilmiş yün ve pamuk boyamaları üzerinde çalışılmıştır. Sonuçlar, özel bir ön işlemden sonra süperkritik karbondioksit içinde dispers boyalarla yün veya pamuğun boyanmasının mümkün olduğunu göstermektedir (Gebert vd, 1994).

Liu ve arkadaşları süperkritik karbon dioksitte rami elyafının benzillenmiş modifikasyonu ve boyanması üzerine çalışmışlardır. Çalışmada ham ve benzile edilmiş rami lifleri süperkritik karbon dioksit içinde boyanmış ve rami lifinin renk kuvveti ultraviyole görünür spektroskopisi ile ölçülmüştür. Benzillenmiş rami elyafı, süperkritik CO₂ içinde bir dispers boya ile boyanmış ve daha yüksek renk kuvveti değerleri ile daha iyi bir boya etkinliği elde edilmiştir (Liu vd, 2008).

Liu ve arkadaşları ayrıca, rami elyafının Dispers Red 74 boyalarla süperkritik karbon dioksitte boyanmaları üzerine çalışmışlardır. Bu çalışma sonucunda da elde edilen verilerde renk verimleri ve suyla yıkama haslıkları mükemmeldir (Liu vd, 2006).

Cid ve arkadaşları floro triazin reaktif boyalar kullanarak pamuk elyafının süperkritik karbon dioksitte boyanması üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada küçük partili bir reaktörde ve ölçekli bir kaptaki %100 mükemmel boya fiksasyonu ve 30'a varan renk kuvveti değerleri elde edilmiştir. Boyalı pamukta boyanın eşit bir şekilde dağıldığı ve pamuğun zarar görmediği görülmüştür. Bu çalışma ile pamuğun süperkritik ile boyanmasının suya göre birçok avantajı belirlenmiştir. %100 boya fiksasyonu elde etmek mümkün olduğundan, fikse olmamış boyayı çıkarmak için boyamadan sonra pamuğun durulanmasının gerekli değildir. Sonuç olarak, su tüketimi ve atık su üretimi yoktur ve tekstili kurutmak için enerji gerekli değildir. Boya ve yardımcı çözücü, işlemin sonunda CO₂'den kolayca ayrılabilir ve CO₂ yeniden kullanılabilir (Fernandez Cid vd, 2005).

Özcan ve arkadaşları modifiye edilmiş pamuk elyafının süperkritik karbon dioksitte boyanması üzerine çalışmışlardır. Çalışmada daha önce benzoil klorür ve sodyum benzoiltiyoglikolat ile reaksiyona sokularak modifiye edilen pamuk, 100°C'de ve 300 bar'da süperkritik karbondioksit içinde dispers boyalar APAN ve DY82 ile boyanmıştır. Bu işlem, aynı koşullar altında poliester ve modifiye edilmemiş pamuğun boyanması ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda modifiye pamuğun benzoil klorür ile boyanması iki dispers boya ile de başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir (Özcan vd, 1998).

Tabata ve arkadaşları süperkritik boyamada dispers boyaların çözünürlüğü ile denge boya adsorpsiyonu arasındaki ilişki üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada boya çözünürlüğü, belli bir basınç (7.5 ± 25 MPa) ve sıcaklık (50–145 °C) aralığında dinamik bir analitik yöntemle ölçülmüştür. Görünür boyama hızı ölçülmüş ve boyama izotermi, denge boya adsorpsiyonunun denge boya banyosu konsantrasyonuna karşı grafiği çizilerek elde edilmiştir. Polietilenteraftalat numuneleri dispers boyalarla boyandığında lineer izoterm elde edilmiştir. Çözünürlük, boyama hızı ve boyama izotermi dikkate alınarak süperkritik karbondioksit kullanılarak boyama mekanizması tartışılmıştır. Bulgulara göre boya molekülleri lif içinde dağılma yasasına uyarak dağılmıştır ve boyama afinitesi, sulu bir sistem kullanılarak normal dispers boyama ile hemen hemen aynı, ancak çözücü boyama ile karşılaştırıldığında daha yüksektir (Tabata vd, 2001).

Bach ve arkadaşları, Polietilenteraftalat liflerinin süperkritik karbon dioksitte azo dispers boyalarla boyanması üzerine çalışmışlardır. Çalışmada azo dispers boyaların süperkritik karbon dioksit içindeki çözünürlük verileri, Polietilenteraftalat elyaflarının CI Disperse Red 167:1 ile 200–300 bar ve 80–120 °C'de değişen miktarlarda katkı maddeleriyle boyanması için sunulmuştur. Sonuç olarak süperkritik karbondioksit ve suda gerçekleştirilen boyamalarda, boyanın PETP lifleri tarafından alınması hemen hemen aynı değerlerde bulunmuştur (Bach vd, 2001).

Jun ve arkadaşları süperkritik CO₂'de yünlü kumaşların perfloropolieter ters miselleri ile boyanması üzerinde çalışmışlardır. Süperkritik CO₂'de PFPE yüzey aktif cismi ters misel sisteminden yünlü

kumaşların boyanması incelenmiştir. Konvansiyonel asit boya, bu sistemden yapılan boyamalarda yardımcı madde ilavesi olmadan kısa sürede yn lifleri üzerine etkili bir Şekilde adsorbe edilebilmiştir. Asit boyanın tükenmesi neredeyse mkemmelenmiştir. Ayrıca, bu sistemdeki asit boyanın yn lifleri üzerindeki boyanabilirliğinin, boya ters miselin iç kısmında tatmin edici bir Şekilde zndğnde, CO₂ yoğunluğunun farklılıklarından pek etkilenmediği de bulunmuştur (Jun vd, 2004).

Bao ve arkadaşları Dispers Red 60 boyalarının süperkritik CO₂'de çözünürlüğü ile PET elyafının boya alımı arasındaki ilişkiler üzerinde çalışmışlardır. 353°K, 373°K ve 393°K sıcaklıklarda ve 11 MPa ila 23 MPa basınçlarda Disperse Red 60'ın süperkritik CO₂ içindeki çözünürlükleri belirlenmiştir. Boyanın znrlğ ile elyaf üzerindeki alımı arasındaki ilişkileri ortaya çıkarmak için, karşılık gelen basınç ve sıcaklıklarda süperkritik CO₂ içinde PET elyaf boyamaları gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, çok yüksek çözünürlüğün yüksek boya alımı için faydalı olmadığını, çünkü PET'in süperkritik CO₂'de boyanmasının da suda olduğu gibi bölme kuralına uyduğunu göstermiştir (Bao ve Dai, 2005).

Cid, pamuk elyafının süperkritik karbon dioksitte boyanması üzerine çalışmalar yapmıştır. Çalışmada bir reaktif dispers boyanın süperkritik CO₂ içinde metanol ile reaksiyonunun ilk kinetik çalışması yapılmıştır. Kinetik veriler, süperkritik CO₂'nin boyanın reaktivitesi üzerindeki olumlu etkisini göstermiştir ve pamukla reaksiyona girmeye daha uygun yeni boya yapılarının tasarlanmasını kolaylaştırmıştır (Fernandez Cid, 2005).

Kinetik alışma, monoklorotriazin reaktif grubuna sahip boyaları kapsayacak Şekilde genişletilmiştir. Boya yapısı ile reaksiyon ortamı arasında net bir ilişki olduğu ortaya konulmuştur. Reaksiyon ortamına asit ilavesinin boya ve metanol reaksiyonunu katalize ettiği gözlenmiştir. Bu alışma sayesinde, süperkritik CO₂'te reaktif grup olarak bir triazinil halkası ve bir birincil alkol grubu ile reaktif dispers boyaların reaksiyon mekanizmalarını kurmak mümkün olmuştur (Fernandez Cid, 2005).

Schmidt ve arkadaşları doğal elyafların süperkritik karbon dioksitte reaktif dispers boyalarla boyanması üzerine çalışmışlardır. Reaktif gruplar olarak, 2-bromoakrilik asit ve 1,3,5-trikloro-2,4,6-triazin ile değiştirilmiş Dispers Sarı 23 boyalar kullanılmıştır. Pamuk elyafa herhangi bir ön işlem uygulanmadan bu reaktif dispers boyalar kullanılarak boyanmıştır; yn ve ipekte renk derinliği pamuğa göre daha yüksek bulunmuştur. Tüm boyamaların yıkama, sürtme ve ışık haslığı 4 ile 5 arasında derecelendirilmiştir. Bir poliester/pamuk elyafı karışımı da tek adımlı bir işlemede boyanmıştır (Schmidt vd, 2003).

Sonuçlar, doğal liflerin, lifin n işlemine tabi tutulmadan süperkritik CO₂ içinde boyanmasının mümkün olduğunu göstermiştir. Genel olarak, 2-bromoakrilik asit ile yüksek renk verimleri ve mkemmelenmiş haslık boyamaları elde edilirken, elyaf reaktif grubu olarak 1,3-dikloro-2,4,6-triazin için sonuçlar önemli ölçüde daha düşük çıkmıştır. Ayrıca, 2-bromoakrilik asitle modifiye edilmiş boya için, protein liflerinin amino- ve tiyol-gruplarının boyanması genellikle daha kolay olduğu için pamuğa göre daha yüksek renk verimiyle boyanmıştır (Schmidt vd, 2003).

Von Schnitzler ve Eggers süperkritik bir karbondioksit atmosferinde polimerlerde kütle transferi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada polimerlerin amorf bölgelerindeki kütle aktarım mekanizmasını daha iyi anlamak için, süperkritik bir CO₂-atmosferinde işlem sırasında Polietilenteraftalat (PET) içindeki difüzyon araştırılmıştır. Çalışma, kütle aktarımının gravimetrik ölçümleri ile tek bir polimer numunesi üzerinde PET'in süperkritik CO₂ içindeki Őiřme davranışının eř zamanlı incelenmesine dayanır. PET'in Őiřmesi, başka bir camsı polimerin (bisfenol-A polikarbonat) süperkritik CO₂ içindeki Őiřme davranışıyla karşılaştırılmıştır. Farklı maddelerle ilgili difüzyon katsayılarını hesaplamak için, polimerik matriste CO₂ ve farklı dispers boya türlerinin soğurulmasına ilişkin deneysel veriler llmştir (von Schnitzler ve Eggers, 1993).

Ngo ve arkadaşları polimerlere süperkritik karbon dioksitte farklı azo boyalarının emdirilmesi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada CO₂ basınçlarının ve spesifik moleküller arası etkileşimlerin difüzyon hızı (veya difüzivite) ve boya çözünenlerinin sıvı faz ile poli(metil metakrilat) (PMMA) arasında bölünmesi

üzerindeki etkileri bildirilmiştir. Aynı zamanda, karşılıklı moleküller arası etkileşimler sağlayabilen ve böylece polimer matrisi ile etkileşimleri azaltabilen bir boya karışımı ile difüzyonu artırma olasılığı gösterilmiştir (Ngo vd, 2003). CO₂ basıncındaki artış, sıvı faz üzerinde PMMA'da daha hızlı difüzyon hızı, daha yüksek yayılma ve daha küçük çözünen madde bölünme katsayısı ile sonuçlanmıştır. DO25'in PMMA'da difüzyonuna ilişkin bu çalışma, spesifik moleküller arası etkileşimlerin, polimer matrisindeki boya çözünenlerinin difüzyon davranışını önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermiştir. En önemlisi, boyaların karşılıklı difüzyonunun arttığı gözlemlenmiştir, böylece süperkritik sıvı boyama prosesleri için yeni fırsatlar sağlanmıştır.

Kaynakça

“The United Nations world water development report, 2017: Wastewater: the untapped resource - UNESCO Digital Library”:
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247153?posInSet=1&queryId=371058ba-04dc-44bb-bd94-4a894fc4fa3c> [Erişim Tarihi: 12.01.2023]

Aivazidou, E., Tsolakis, N. (2019). Water footprint management in the fashion supply chain: A review of emerging trends and research challenges. *Water in Textiles and Fashion* (Editör) Muthu S.S. (77-94). Elsevier. doi:10.1016/b978-0-08-102633-5.00005-1

Alkaya, E., Demirer, G. N. (2015). Water recycling and reuse in soft drink/beverage industry: A case study for sustainable industrial water management in Turkey. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 172-180. doi:10.1016/J.RESCONREC.2015.08.011

AQUASTAT - FAO's Global Information System on Water and Agriculture:
<https://www.fao.org/aquastat/en/> [Erişim Tarihi: 21.12.2022]

Bach, E., Cleve, E., Schüttken, J., Schollmeyer, E. & Rucker, J. W. (2001). Correlation of solubility data of azo disperse dyes with the dye uptake of poly(ethylene terephthalate) fibres in supercritical carbon dioxide. *Coloration Technology*, 117(1), 13-18.

Bao, P. & Dai, J. (2005). Relationships between the solubility of C. I. disperse red 60 and uptake on PET in supercritical CO₂. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 50(3), 838-842. doi:10.1021/jc0496847

Boström, M. & Micheletti, M. (2016). Introducing the Sustainability Challenge of Textiles and Clothing. *Journal of Consumer Policy*, 39(4), 367-375. doi:10.1007/S10603-016-9336-6/METRICS

Cardozo-Filho, L., Mazzer, H. R., Santos, J. C., Andreus, J., Feihmann, A. C., Beninca, C., ... Zanoelo, E. F. (2014). Dyeing of polyethylene terephthalate fibers with a disperse dye in supercritical carbon dioxide. *Textile Research Journal*, 84(12), 1279-1287. doi:10.1177/0040517513515317

Cassidy, T. & Goswami, P. (2017). *Textile and Clothing Design Technology*. Boca Raton : Taylor & Francis, CRC Press. doi:10.1201/9781315156163

de Brito, M. P., Carbone, V. & Blanquart, C. M. (2008). Towards a sustainable fashion retail supply chain in Europe: Organisation and performance. *International Journal of Production Economics*, 114(2), 534-553. doi:10.1016/J.IJPE.2007.06.012

Fane, B., Wastl, J. (2022) When economy meets environment: Sustainable development and the case of wastewater pollution in textile manufacturing - Digital Science: <https://www.digital->

science.com/blog/2022/04/sdgs-wastewater-pollution-in-textile-manufacturing/ [Erişim Tarihi: 13.01.2023]

Fernandez Cid, M. v., Gerstner, K. N., van Spronsen, J., van der Kraan, M., Veugelers, W. J. T., Woerlee, G. F. ve Witkamp, G. J. (2007). Novel Process to Enhance the Dyeability of Cotton in Supercritical Carbon Dioxide. *Textile Research Journal*, 77(1), 38-46. doi:10.1177/0040517507076328

Fernandez Cid, M. v., van Spronsen, J., van der Kraan, M., Veugelers, W. J. T., Woerlee, G. F. & Witkamp, G. J. (2005). Excellent dye fixation on cotton dyed in supercritical carbon dioxide using fluorotriazine reactive dyes. *Green Chemistry*, 7(8), 609-616. doi:10.1039/b503801d

Fernandez Cid, M.V. (2005). *Cotton Dyeing in Supercritical Carbon Dioxide*. Yayınlanmış doktora tezi, Universidad de Santiago de Compostela, İspanya.

Gebert, B., Saus, W., Knittel, D., Buschmann, H. & Schollmeyer, E. (1994). Dyeing Natural Fibers with Disperse Dyes in Supercritical Carbon Dioxide. *Textile Research Journal*, 64(7), 371-374. doi:10.1177/004051759406400701

Gebert, K. (1971). The Dyeing of Polyester Textile Fabric in Perchloroethylene by the Exhaust Process. *Coloration Technology*, 87(12), 509-513.

Hussain, N., Hussain, S., Mehdi, M., Khatri, M., Ullah, S., Khatri, Z., ... Kim, I. S. (2021). Introducing deep eutectic solvents as a water-free dyeing medium for poly (1,4-cyclohexane dimethylene isosorbide terephthalate) pict nanofibers. *Polymers*, 13(16). doi:10.3390/polym13162594

Hussain, T. & Wahab, A. (2018). A critical review of the current water conservation practices in textile wet processing. *Journal of Cleaner Production*, 198, 806-819. doi:10.1016/j.jclepro.2018.07.051

Hussain, T., Tausif, M. & Ashraf, M. (2015). A review of progress in the dyeing of eco-friendly aliphatic polyester-based polylactic acid fabrics. *Journal of Cleaner Production*. 108(6), 476-483. doi:10.1016/j.jclepro.2015.05.126

Jiang, Z., Cui, Y., Zheng, G., Wei, Y., Wang, Q., Zhou, M., ... Yu, Y. (2022). An innovative, low-cost and environment-friendly approach by using a deep eutectic solvent as the water substitute to minimize waste in the textile industry and for better clothing performance. *Green Chemistry*, 24(15), 5904-5917. doi:10.1039/d2gc01292h

Jun, J. H., Sawada, K. & Ueda, M. (2004). Application of perfluoropolyether reverse micelles in supercritical CO₂ to dyeing process. *Dyes and Pigments*, 61(1), 17-22. doi:10.1016/j.dyepig.2003.08.003

Liu, Z. T., Sun, Z., Liu, Z. W., Lu, J. & Xiong, H. (2008). Benzylated modification and dyeing of ramie fiber in supercritical carbon dioxide. *Journal of Applied Polymer Science*, 107(3), 1872-1878. doi:10.1002/app.27220

Liu, Z. T., Zhang, L., Liu, Z., Gao, Z., Dong, W., Xiong, H., ... Tang, S. (2006). Supercritical CO₂ dyeing of ramie fiber with disperse dye. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 45(26), 8932-8938. doi:10.1021/ie061093h

Miah, L., Mir, D. & Azad, M. (2013). Textiles Material Dyeing with Supercritical Carbon Dioxide (CO₂) without using Water Smoothing, Sharpening and Segmentation of Image View project photonic crystal fiber View project. *Chemistry and Materials Research*, 5(3), 38-40.

Mishra, S. P. (2016). *Fibre Structure*, WPI Publishing. doi:10.1201/9789385059636.

Nawab, Y. (2016). *Textile Engineering*, De Gruyter. doi:10.1515/9783110413267

Ngo, T. T., Liotta, C. L., Eckert, C. A. & Kazarian, S. G. (2003). Supercritical fluid impregnation of different azo-dyes into polymer: In situ UV/Vis spectroscopic study. *Journal of Supercritical Fluids*, 27(2), 215-221. doi:10.1016/S0896-8446(02)00239-5

Ozcan, A. S., Clifford, A. A., Bartle, K. D. & Broadbent, P. J. (1998). Dyeing of modified cotton fibres with disperse dyes from supercritical carbon dioxide. *Journal of the Society of Dyers and Colorists*, 114(5-6), 196-173.

Pawar, S. S. & Adivarekar, R. (2021). A novel approach for dyeing of polyester using non-aqueous deep eutectic solvent as a dyeing medium. *Pigment and Resin Technology*, 50(1), 1-9. doi:10.1108/PRT-09-2019-0085

Pawar, S. S., Maiti, S., Biranje, S., Kulkarni, K. & Adivarekar, R. v. (2019). A novel green approach for dyeing polyester using glycerine based eutectic solvent as a dyeing medium. *Heliyon*, 5(5). doi:10.1016/j.heliyon.2019.e01606

Restiani, P., Temizel, S., Cılız, N. (2016). WATER GOVERNANCE MAPPING REPORT: TEXTILE INDUSTRY WATER USE IN TURKEY: <https://siwi.org/wp-content/uploads/2017/06/Water-governance-mapping-report-Turkey.pdf> [Erişim Tarihi: 14.01.2023]

Saleem, M. A., Pei, L., Saleem, M. F., Shahid, S. & Wang, J. (2020). Sustainable dyeing of nylon with disperse dyes in Decamethylcyclopentasiloxane waterless dyeing system. *Journal of Cleaner Production*, 276. doi:10.1016/j.jclepro.2020.123258

Saus, W., Knittel, D. & Schollmeyer, E. (1993). Dyeing of Textiles in Supercritical Carbon Dioxide. *Textile Research Journal*, 63(3), 135-142. doi:10.1177/004051759306300302

Schmidt, A., Bach, E. & Schollmeyer, E. (2003). The dyeing of natural fibres with reactive disperse dyes in supercritical carbon dioxide. *Dyes and Pigments*, 56(1), 27-35.

Shah, C. D. & Jain, D. K. (1985). Solvent (Perchloroethylene) Dyeing of Disperse Dyes on Polyester. *Textile Research Journal*, 55(1), 23-27.

Shen, B. (2014). Sustainable Fashion Supply Chain: Lessons from H&M. *Sustainability* 2014, 6, 6236-6249, 6(9), 6236-6249. doi:10.3390/SU6096236

Sreenivasa Murthy, H. v. (2018). *Introduction to Textile Fibres*, WPI Publishing. doi:10.1201/b20597

Tabata, I., Lyu, J., Cho, S., Tominaga, T. & Hori, T. (2001). Relationship between the solubility of disperse dyes and the equilibrium dye adsorption in supercritical fluid dyeing. *Coloration Technology*, 117(6), 346-351.

The United Nations world water development report, 2017: Wastewater: the untapped resource - UNESCO Digital Library:
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247153?posInSet=1&queryId=371058ba-04dc-44bb-bd94-4a894fc4fa3c> [Erişim Tarihi: 12.01.2023]

von Schnitzler, J. & Eggers, R. (1999). Mass transfer in polymers in a supercritical CO₂-atmosphere. *The Journal of Supercritical Fluids*, 16(1), 81-92.

Wang, L., Ding, X., Wu, X. & Yu, J. (2013). Textiles industrial water footprint: Methodology and study. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 72(11), 710-715.

WTO | International Trade Statistics 2015:
https://www.wto.org/english/res_e/statis_e/its2015_e/its15_toc_e.htm [Erişim Tarihi: 14.01.2023]

Xie, K., Cheng, F., Zhao, W. & Xu, L. (2011). Micelle dyeing with low liquor ratio for reactive dyes using dialkyl maleic acid ester surfactants. *Journal of Cleaner Production*, 19(4), 332-336. doi:10.1016/j.jclepro.2010.10.006

Xu, S., Chen, J., Wang, B. & Yang, Y. (2015). Sustainable and hydrolysis-free dyeing process for polylactic acid using nonaqueous medium. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 3(6), 1039-1046. doi:10.1021/sc500767w

Xu, S., Chen, J., Wang, B. & Yang, Y. (2016). An environmentally responsible polyester dyeing technology using liquid paraffin. *Journal of Cleaner Production*, 112, 987-994. doi:10.1016/j.jclepro.2015.08.114