



TEKSTİL VE MÜHENDİS
(Journal of Textiles and Engineer)



<http://www.tekstilvemuhendis.org.tr>

Lif Açma İşleminin Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozitlerin Mekanik ve Yalıtım Özellikleri Üzerindeki Etkisi

Effect of Fiber Opening Process on Mechanical and Insulating Properties of Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites

Hayriye Hale AYGÜN

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kahramanmaraş, Türkiye

Online Erişime Açıldığı Tarih (Available online):30 Haziran 2020 (30 June 2020)

Bu makaleye atıf yapmak için (To cite this article):

Hayriye Hale AYGÜN (2020): Lif Açma İşleminin Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozitlerin Mekanik ve Yalıtım Özellikleri Üzerindeki Etkisi, Tekstil ve Mühendis, 27: 118, 75-83.

For online version of the article: <https://doi.org/10.7216/1300759920202711803>

Sorumlu Yazara ait Orcid Numarası (Corresponding Author's Orcid Number) :

<https://orcid.org/0000-0002-2812-8079>



Arastırma Makalesi / Research Article

LİF AÇMA İŞLEMİNİN CAM ELYAF TAKVİYELİ EPOKSİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE YALITIM ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Hayriye Hale AYGÜN*

<https://orcid.org/0000-0002-2812-8079>

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kahramanmaraş, Türkiye

Gönderilme Tarihi / Received: 19.02.2020

Kabul Tarihi / Accepted: 15.06.2020

ÖZET: Bu çalışmada, farklı lif boy/çap oranına sahip kırılmış cam elyaflar, basınçlı hava ile açılmış elyaf demedi haline getirilmiş ve epoksi matrisin takviyelendirilmesinde kullanılmıştır. Ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında elyaf takviyesiyle elle yatırma yöntemiyle üretilen kompozitlere çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve ısı iletkenlik testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, eş işlem parametrelerinde üretilen kırılmış cam elyaf takviyeli kompozitler ile kıyaslanmıştır. Lif açma süresinin kullanılan kırılmış lifin boy/çap oranına bağlı olmadığı ve lif boyunun lif açma süresi üzerinde lif çapına göre daha önemli etkiye olduğu görülmüştür. Uzun lif boyuna sahip kırılmış cam elyafların lif açma işlemine daha hızlı cevap verdiği gözlenmiştir. Lif açma işlemi genel anlamda kompozitlerin çekme ve eğilme dayanımlarında düşüşe ancak yalıtım özelliklerinde artışa neden olmuştur. Lif boy/çap oranı 4.5 mm/13 µ olan cam elyaf tipi için, açılmış elyaf demedi kullanılarak daha düşük konsantrasyonda yüksek çekme dayanımı elde edilmesi söz konusudur. Eğilme dayanımı üzerinde lif boyunun etkisinin yüksek olduğu ve açma işlemi sonrasında, lif boy/çap oranları 3 mm/13 µ ve 4.5 mm/10.5 µ olan cam elyaf tiplerinin eğilme dayanımı davranışlarının daha tutarlı hale geldiği tespit edilmiştir. Lif açma işleminin kompozitlerin ısı iletim katsayılarının düşmesinde etkili olduğu ve kompozitleri daha yalıtkan hale getirdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Açılmış cam elyaf demedi, epoksi matris, lif boy/çap oranı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı, ısı iletim katsayısı

EFFECT OF FIBER OPENING PROCESS ON MECHANICAL AND INSULATING PROPERTIES OF GLASS FIBER REINFORCED EPOXY COMPOSITES

ABSTRACT: In this study, chopped glass fibers with various fiber aspect ratios were opened via pressurized air application and obtained fiber bundles were used for reinforcing of epoxy matrix. Composites with fiber contents of 5%, 10% and 15% in weight were produced by hand lay-up technique and these samples were exposed to tensile, flexure and thermal insulation testing procedures. Results were compared with chopped glass fiber reinforced epoxy composites produced with identical process parameters. The results showed that opening process period was not related with fiber aspect ratio of chopped fiber and fiber length had an important effect on opening process period than that of fiber diameter. Long chopped fibers gave quick response to air pressure application. In general, opening process caused decrease on tensile and flexural strengths of composites but increase on thermal insulating characteristics. For 4.5 mm/13 µ samples, opened fiber reinforced composites exhibited high tensile resistance at low concentration values. Flexural strengths of composite were highly affected from fiber length parameter in both chopped and opened fiber reinforced composites and flexural behaviours of composites reinforced with (3 mm/13 µ) and (4.5 mm/10.5 µ) glass fibers having different fiber aspect ratios became more consistent after opening process. Thermal conductivity coefficients of composites decreased by using opened fibers as reinforcing agent and composites exhibited more insulating characteristics.

Keywords: Opened glass fiber bundle, epoxy matrix, fiber aspect ratio, tensile strength, flexure strength, thermal conductivity coefficient

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: hhalesolak@hotmail.com

DOI: <https://doi.org/10.7216/1300759920202711803> www.tekstilvemuhendis.org.tr

1. GİRİŞ

Lif takviyeli kompozitler, matris fazın sürekli ya da kesikli haldeki liflerle takviyelendirilmesi sonucu üretilmektedir [1]. Sürekli liflerin matris içinde tek ya da iki yönlü yerleştirilmesi mümkünken, kesikli lif ile takviyelendirmede matriste yöne bağlı yerleşim söz konusu değildir. Bu bağlamda lif boyu, lifler arası oryantasyon ve düzenleme matrisin yükü life iletmesi, çatlak oluşumunun engellenmesi ve kompozit malzemenin konstrüksiyonunun korunması açısından önem arz etmektedir [2,3]. Lifin yük taşımaya katkısının olabilmesi için matris üzerindeki mekanik etkinin kayma kuvvetleri ile life iletmesi gerekmektedir. Bu nedenle lif/matris uyumunun iyi olması, lifle matris arasında kayma gerilmelerine dayanabilecek düzeyde bir tutunmanın bulunması ve fazların ısıl genleşme katsayısı değerlerinin kompozitin yapısını bozacak düzeyde farklılık göstermemesi gerekmektedir [4].

Lif takviyeli kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılacak olan liflerin 7-100 µm arasında değişen çaplara sahip olmaları istenmektedir [3]. Farklı kaynaklardan elde edilen, farklı uzunluk ve şekillere sahip lifler kullanıldığından, lif çapı ve boy/çap oranı belirleyici bir ölçüt olarak kabul edilmektedir. Ancak lif boyu belirli bir değerde olması gerektiğinden, lif çapının da sınırlayıcı bir değerde olması istenmektedir. Lif konsantrasyonu, malzemenin özelliklerini değiştirmek için kolaylıkla kontrol edilebilen bir üretim değişkeni olarak tanımlanmaktadır [3,4].

Lif takviyeli kompozitlerde en yaygın şekilde kullanılan sentetik esaslı lif cam elyafıdır. 5-20 µm çapında üretilen cam lifleri üzerine film oluşturucu, bağlama grupları, antistatik katkı, plastikleştirici madde ve yağlayıcı madde adı verilen malzemelerin karışımından oluşan çok bileşenli silan esaslı bir madde ile kaplanmaktadır [5,6]. Silan esaslı madde ile kaplanmış cam elyafı, yüksek kimyasal ve mekanik dayanımına sahip olması ve termal kararlılığından dolayı sıkça tercih edilmektedir. Ancak cam elyaf çeşitlerinin, kompozit malzeme üretiminde kullanılan konvansiyonel mekanik tekniklerle işlenmeleri zorlu olduğundan farklı formdaki cam elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde yoğun mekanik yöntemlerden kaçınılmakta ve genellikle elle yatırma yöntemi tercih edilmektedir [7].

Lif takviyeli kompozitlerin üretiminde polimerik matris malzemeleri, takviye elemanını kolaylıkla sarabilmeleri nedeniyle tercih edilmektedir [8]. Ağırlık/dayanım oranının önemli olduğu yerlerde yüksek dayanıklı polimerik matrisler hafifliklerinden dolayı tercih edilmektedirler [9]. Polimerik matris malzemeleri grubunda yer alan *termoset polimerler*; ısı ile katalizörle, mor ötesi ışınla muamele edildiğinde genellikle çapraz bağlı bir yapı meydana getirerek, sertleşen ve artık tekrar ısıtıldığında yumuşamayan plastiklerdir. Makro molekülleri birbirlerine çeşitli yerlerinden kısa aralıklarla kovalent bağlarla bağlandığından ağısı yapıdadırlar ve bu ağ yapı sıcaklık ve basınç altında sertleşerek tekrar çözülmemektedir. Bu nedenle termosetlerin ısıl ve mekanik dayanımları termoplastiklere göre oldukça yüksektir [8]. Epoksi ve polyeester reçineleri termoset plastikler grubunda yer alan ve lif takviyeli kompozitlerde sıkça kullanılan

matris tipleridir. Epoksi reçineleri, birçok elyaf ile iyi bağ kuran reçine tiplerindedir. Sertleşme süreleri ve sıcaklık uygulaması gereksinimi sertleştirici maddenin miktarına ve tipine bağlıdır. Bazı sertleştiriciler ile oda sıcaklığında reaksiyon başlamakta ve sertleşme gözlenmektedir. Sertleşme seçilen sertleştirici türüne bağlı olarak 5-150 °C aralığında gerçekleştirilmektedir. Sıvı ya da katı halde temin edilebilen epoksi reçinelerin sertleşmesi sırasında çekme sorunu gözlenmemektedir [10,11]. Yüksek tutunma kabiliyeti, sertleşme boyunca düşük büzüşme yüzdesi, mükemmel mekanik dayanım, yüksek dielektrik direnç, iyi boyutsal kararlılık, uygulama kolaylığı ve çabuk sertleşme davranışları avantajları arasında yer alırken, maliyetli olmaları ve UV dayanımlarının düşük olmaları ise dezavantajları olarak bilinmektedir. Herhangi bir basınç ya da ek uygulamaya gerek olmaksızın ıslatılabilirliği yüksek liflerle iyi düzeyde tutunma eğilimine sahiptirler. Yüksek elektriksel yalıtımlığa sahip oluşları yalıtkan kompozitlerin elde edilmesinde sıkça kullanılmalarına neden olmaktadır [10,12]. Epoksi reçinelerin özellikleri Tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1. Epoksi reçinelerin genel özellikleri [10]

	Epoksi reçine
Yoğunluk, g/cm ³	1.2-1.3
Çekme dayanımı, MPa	55-30
Çekme modülü, GPa	2.75-4.10
Poisson oranı	0.2-0.33
Isıl genleşme katsayısı, 10 ⁻⁶ m/m / °C	50-80
Sertleşmede çekme oranı, %	1-5

Cam elyaf takviyeli kompozitlerin farklı matrislerle üretimi, kullanılan lifin boy ve çap değerlerindeki değişimin mekanik dayanım üzerindeki etkilerinin incelenmesi üzerine bir takım çalışmalar bulunmaktadır. Hancock ve Cuthbertson (1970) kırılmış cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin eğilme mukavemeti üzerinde lif boyunun etkisini incelemişler ve tek yönlü lif düzenlemesi ile üretilen kompozitlerde kritik lif uzunluğunun 0.5 inch (12.7 mm) ve arayüz kayma mukavemetinin 9.5 MPa olduğunu ifade etmiştir [13]. Kinsella ve ark. (2001) 9-26 mikron aralığında değişen lif çapına sahip farklı tipteki cam filamentler ya da dokuma yüzeyler ile takviyelendirdikleri epoksi ve vinil/polyester matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini araştırmışlar ve lif çapı arttıkça basma dayanımında belirgin bir artış olduğunu, en iyi çekme dayanımının 18 mikronda (>1600 MPa) ve en iyi basma dayanımının 25 mikronda (>1600 MPa) olduğunu rapor etmişlerdir [14]. Thomason (2002) lif boyu ve lif çapının cam lif takviyeli polipropilen kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiş ve ağırlıkça %0-40 konsantrasyon aralığında, E tipi cam lifi ile takviyelendirilen kompozitlerin çekme, darbe ve eğilme dayanımlarının lif çapı sabit tutulduğunda uzun lif takviyeli kompozitlerde çok iyi olduğunu, lif çapının azalması ile kısa lif takviyeli kompozit yapıların lif çapı arttıkça da uzun lif takviyeli kompozitlerin mekanik dayanımının arttığını rapor

etmiştir [15]. Obukoro ve ark. (2008), 7-45 μ çap aralığındaki cam lifleri ile aynı tip matris malzemeyi takviyelendirerek kompozit malzeme üretmişler, kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin optimum düzeydeki lif çapına (20, 25 ve 30 μ) bağlı olduğunu ve malzemenin esnekliğinin artan lif çapı ile doğru orantılı olarak arttığını ancak 30 μ dan daha kalın liflerle takviyelendirmenin esneklik değeri üzerinde bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir [16]. Bagherpour (2012) kırılmış E-tipi cam elyaf takviyeli polyester matrisli kompozitlerde lif boyunun artmasıyla çekme dayanımının genel olarak arttığını, lif oryantasyonunun kompozitin sertlik ve mukavemeti üzerinde oldukça etkili olduğunu, kısa ve rastgele lif dağılımına sahip kompozitlerin izotropik davrandığını ve lifin matrise kolayca adapte olduğunu ifade etmiştir. Uzun lif boyu kullanılarak yapılan çok yönlü dağılımlarda ise lif doğrultusunda kompozitin yüksek mukavemete sahip olduğunu ancak life dik yönde uygulanan kuvvet altında kompozitin zayıf mekanik özelliklere sahip olduğunu ifade etmiştir [17].

Literatürde yer alan çalışmalar sonucunda cam elyafının kontinü filament halde ya da filamentlerden dokuma yüzey üretimi sonrasında farklı matrislerin takviyelendirilmesinde kullanıldığı görülmektedir. Kontinü filament haldeki cam elyaf şeridi üretimi sırasında, eriyik haldeki cam akışkanı yaklaşık 4000-8000 düzeden oluşan eğirme ünitelerinden geçmekte, her bir düzeden bir cam monofilamenti elde edilmektedir. Ancak toplam düze sayısı adedince üretilen monofilamentlerin birleştirilmesi sonucunda elde edilen multifilamentin bağlayıcı madde ve çeşitli ajanlarla kaplanması sonrasında bobinlere sarılması ve piyasaya sürülmesi söz konusudur [6,18]. Multifilament haldeki cam elyaflarının belirli uzunluklarda kesilmesiyle kırılmış cam elyaf üretimi gerçekleştirilmektedir. Kırılmış cam elyafın lif açma işlemine tabi tutulması durumunda, hava basıncı lifin kesit ve boyamsal uzunluğuna daha etkin şekilde uygulanmakta ve kırılmış cam elyafı içerisindeki monofilamentler ayrıştırılmaktadır. Lif açma işlemi sonrasında, kırılmış cam elyafının açılmış cam elyaf demedine dönüşmesi, genellikle doğal esaslı liflerde görülen hacimli fiziksel formu taklit etmesi ve kırılmış haldeki multifilament içindeki her bir monofilamentin birbirinden bağımsız olması sayesinde matris ile arayüz bağlantısının artması söz konusu olmaktadır. Bu sayede cam elyafının kompozitin mekanik özelliklerinin gelişmesine sağladığı katkı, lifin karakteristiğine, lif boy ve çap oranına bağlılık derecesinin matris tipine bağlı olarak değişimi incelenebilmektedir. Bu çalışma, farklı lif boy/çap oranına sahip kırılmış cam elyaflarının basınçlı hava uygulaması ile açılmış demedi halindeki cam elyaflarına dönüştürülmesi, lif açma işlemi sayesinde lifin fiziksel formunda oluşan değişikliğin epoksi matrisli kompozitin mekanik ve yalıtım özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi üzerinedir. Elle yatırma yöntemiyle, açılmış ve kırılmış cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit numunelerin üretimi gerçekleştirilmiş ve numunelere çekme, eğilme ve ısı yalıtım testleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, kırılmış cam elyaf takviyeli kompozitler ile kıyaslanmış ve lif açma işleminin sistemin mekanik ve ısı yalıtım özellikleri üzerindeki etkileri

yorumlanmıştır. Bu çalışma, literatürde kırılmış cam elyafının basınçlı hava uygulaması sonucu demet haline dönüştürülmesi ve açılmış cam elyaf demedi ile takviyelendirilmiş kompozit malzeme üretimine dair herhangi bir çalışma bulunmaması açısından farklılık arz etmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyaller

Takviye elemanı olarak PP₄ (polypropylene), PH₂ (phenolic) ve PBT₂ (polybutylene terephthalate) kodlu E-tipi kırılmış cam elyaf tipleri Cam Elyaf A.Ş. den temin edilmiştir. Reçine tipine gösterdikleri uyumluluk dikkate alınarak isimlendirilen bu üç tip cam elyafın özellikleri Tablo 2 de verilmiştir.

Tablo 2. Kırılmış cam elyaf özellikleri

	PP ₄	PBT ₂	PH ₂
Cam tipi	E	E	E
Elyaf çapı (μ)	13	10.5	13
Kırılma boyu (mm)	4.5	4.5	3
Nem miktarı (%)	max. 0.07	max. 0.07	max. 0.07
Bağlayıcı miktarı (%)	0.65±0.10	0.60±0.12	0.90±0.15
Bağlayıcı türü	Silan	Silan	Silan
Reçine uyumluluğu	Polipropilen	Polibütillen tereftalat	Fenolik

Matris elemanı olarak kullanılan CTP tipi genel amaçlı epoksi reçine ile sertleştiricileri Mar Yapı Ltd Şti den tedarik edilmiştir. Reçine ve sertleştirici özellikleri Tablo 3 de verilmiştir.

Tablo 3. Kullanılan epoksi reçine ve sertleştiricinin fiziksel özellikleri ve kullanım oranları

	Epoksi reçine (Comp A)	Sertleştirici (Comp B)
Fiziksel hal	Sıvı	Sıvı
Renk	Şeffaf	Şeffaf
Suda çözünürlük	Çözünmez	
Uygulama sıcaklığı	10-30 °C	
Epoksi/sertleştirici	3:1	
Üretici firma	Maxicoll	Maxicoll

2.2. Yöntem

2.2.1. Kırılmış cam elyafların basınçlı hava ile açılarak elyaf demedi haline getirilmesi

Farklı boy/çap oranına sahip kırılmış cam elyaf tiplerinden her biri 5 g halinde 5 lt lik PET bidon içerisine konulmuştur. Bidon kapağı üzerine kompresör tabancasının sığacağı büyüklükte küçük bir delik açılmıştır. Etna marka PA2 model basınç şalterli Güzelbulut marka tahliyesiz kompresör yardımıyla bidon içerisine belirli aralıklarla 4 barlık basınçlı hava gönderilmiştir. Lif açma işlemi için hazırlanan düzenek Şekil 1 de gösterilmiştir.



Şekil 1. Lif açma işlemi için hazırlanan düzenek

Lif açma işlemi için herhangi bir cihazın üretilmemiş olması nedeniyle basit şartlarda gerçekleştirilen bu işlem esnasında, farklı cam elyaf tiplerinin açılma sürelerinin tespiti için sayısız deneme yapılmıştır. PET bidonun sürekli uygulanan hava basıncı sonucunda çatlamasını önlemek adına basınç uygulama işlemi süreklilik arz etmemektedir. Kapak üzerinde açılan delik sayesinde yerleştirilen kompresör tabancasının kap içerisine verdiği hava sayesinde kapalı kap içerisinde kısmi bir basınç farkı yaratılmıştır. Şekil 2 de PP₄ (4.5 mm/13 µ) cam elyaf tipinin kırılmış ve açılmış haldeki fiziksel görüntülerinin farklı olduğu gösterilmektedir.

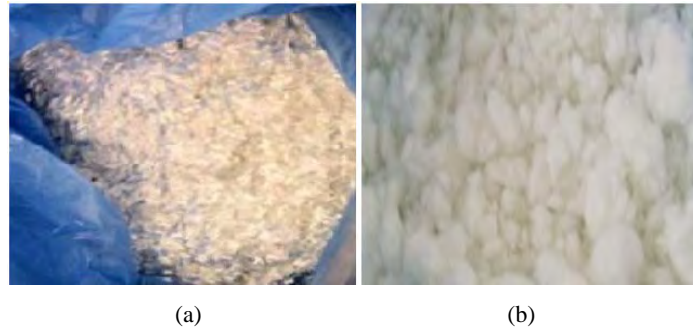
2.2.2. Kompozit malzeme karışımlarının hazırlanması

Ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında açılmış veya kırılmış cam elyaf takviyesi ile epoksi reçine matrisli 600 g lık karışımlar,

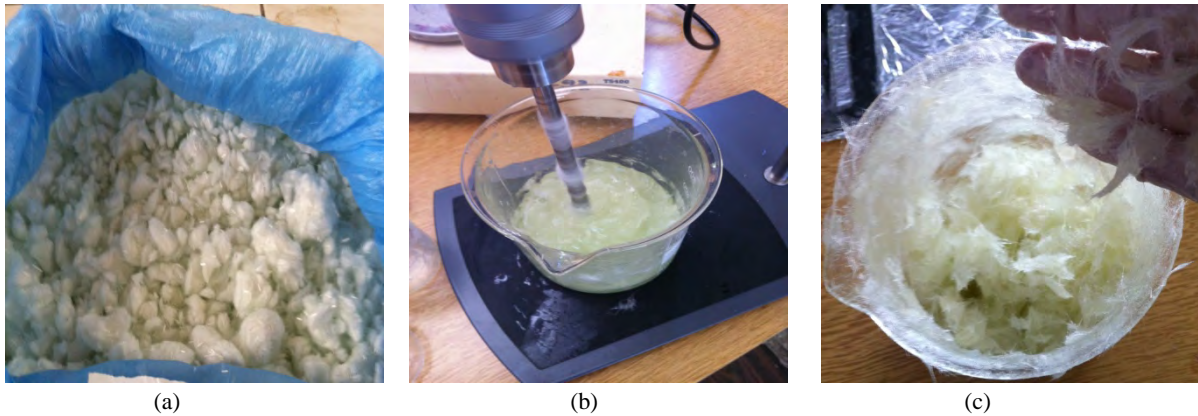
IKA RW20 marka mekanik karıştırıcı ile 2 sa boyunca 500 rpm devirde işleme tabi tutulmuşlardır. Açılmış haldeki cam elyafının kümelenmiş görüntüsü, kompozit malzeme karışımlarının harmanlanması ve harmanlama sonrasında kümelenmenin olmadığı, en uzun lif boyuna ve en geniş lif çapına sahip PP₄ cam elyaf tipine ait görüntülerle Şekil 3 de gösterilmiştir. Sıcaklık ve nem takip sistemi vasıtasıyla ortam çalışma sıcaklığının 25.2 °C ve ortalama nem oranının %77.1 olarak kaydedilmiştir.

Lif/epoksi karışımlarına son 10 dakika içerisinde kullanılan epoksi miktarı dikkate alınarak 3:1 oranında sertleştirici ilave edilmiştir. Toplam karışım miktarı sabit tutularak hazırlanan karışımların içerdikleri epoksi reçine, sertleştirici miktarı ve lif konsantrasyon değerleri Tablo 4 de verilmiştir.

Hazırlanan karışımlar alüminyum folyo kaplı kalıplara elle yatırma yöntemiyle yerleştirilmiştir. Çalışmada kullanılmak üzere 4 mm kalınlığa sahip tek bir kalıp hazırlanmıştır. Kalıp üzerinde çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve ısıl iletkenlik ölçümleri için ilgili standartlar gereğince hazırlanan ayrı kalıplar bulunmaktadır. Epoksi reçine matrisli kompozitler, 24 sa oda sıcaklığında bekletilerek sertleşme sağlanmıştır. Belirlenen süre sonunda alüminyum folyo soyularak sertleşmiş numuneler kalıptan çıkarılmıştır. Sertleşmiş numunelerin kalıp üzerindeki görüntüleri Şekil 4 de gösterilmiştir.



Şekil 2. Lif açma işleminin öncesinde ve sonrasında cam elyafın görüntüleri (a) kırılmış cam elyaf, (b) açılmış cam elyaf



Şekil 3. %10 luk PP₄ kompozit karışımının hazırlanması (a) açılmış PP₄ cam elyafının topaklanmış görüntüsü (b) epoksi reçine/açılmış PP₄ cam elyafının mekanik karıştırıcı ile harmanlanması, (c) harmanlama sonrası elde edilen homojen karışım

Tablo 4. Epoksi matrisli kompozitlerin bileşenleri

Tip	Elyaf	Reçine	Sertleştirici	Karışım	Matris
PP ₄ , PH ₂ , PBT ₂	% 5 (30 g)	%71.25 (427.50 g)	%23.75 (142.50 g)	% 100 (600 g)	Epoksi reçine
	% 10 (60 g)	%67.50 (405 g)	%22.50 (135 g)	% 100 (600 g)	
	% 15 (90 g)	%63.75 (382.50 g)	%21.25 (127.50 g)	% 100 (600 g)	

**Şekil 4.** Sertleşmiş kompozit numunelerin kalıptan çıkarılması (a)Açılmış cam elyaf (b) Kırılmış cam elyaf

2.2.3. Uygulanan testler

Ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında açılmış cam elyaf ya da kırılmış cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit numuneler çekme, eğilme ve ısı iletkenlik testlerine tabi tutulmuşlardır. Her numuneden ilgili test grubu dikkate alınarak 3 adet ölçüm gerçekleştirilmiş ve sonuçların ortalamaları alınarak test sonuçları değerlendirilmiştir. Çekme dayanımı testi, ASTM D3039 standardında belirlenen 25mm*250mm*4mm (*en*boy*kalınlık*) ölçüleri dikkate alınarak hazırlanmış olan kalıba dökülen numunelerin, Zwick Roell marka çekme cihazı kullanılarak 2 mm/dk çekme hızında ve 140 mm çeneler arası mesafede işleme tabi tutulmasıyla gerçekleştirilmiştir [19].

Eğilme dayanımı testi DIN EN ISO 178 standardında belirlenen 10mm*80mm*4mm (*en*boy*kalınlık*) ölçüleri dikkate alınarak hazırlanmış olan kalıplardan elde edilen numunelerin Zwick Roell marka çekme cihazı kullanılarak destekler arası mesafe 60 mm olarak ayarlanması ve 2mm/dk test hızında tabi tutulmasıyla ölçülmüştür. İlgili standartta 1 mm ve 3.5 mm kalınlığındaki numuneler için test hızının 1 mm/dk olması tavsiye edilmektedir. Ancak çalışmada üretilen kompozit malzemelerin kalınlığının 4 mm olması ve standartta düşük kalınlığa sahip numunelerde

1 mm/dk ve 2 mm/dk test hızlarının yüzde tolerans değerlerinin aynı verilmesinden dolayı test hızı 2 mm/dk olarak tercih edilmiştir. İlave olarak ince test numuneleri için, gerekli görülmesi durumunda destekler arası mesafenin numune kalınlığının (16±1) katının alt sınırında alınabileceği vurgulandığından destekler arası mesafe 60 mm olarak alınmıştır [20].

Isıl iletkenlik testi ise 150mm*150mm*4mm (*en*boy*kalınlık*) boyutlarındaki kalıptan çıkarılan numunelere uygulanmıştır. ASTM C 1113 standardı esas alınarak Kyoto Electronic marka KEM QTM 500 model termal iletkenlik ölçüm cihazı kullanılarak test edilmiştir. Ölçümler I²=1000 mA referans değerinde 25 °C ortam sıcaklığında yapılmıştır [21].

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Lif açma işlemi

Lif açma işlemi için herhangi bir cihaz üretilmediğinden ve literatürde lif açma işlemine dair herhangi bir çalışma bulunmadığından uygulamalı çalışmada sayısız denemeler gerçekleştirilerek ortalama değerler verilmiştir. Verilen ortalama değerler, bidon içerisinde kırılmış cam elyaf kalmayana değin yapıldığından ve her cam elyaf tipinin lif boy/çap oranının farklı olmasından dolayı ağırlık bazlı gerçekleştirilmiştir. Açma işleminde PET bidonun kullanılmasındaki amaç, statik elektriklenmeden faydalanmaktır. Benzer lif çap/boy oranlarının kullanılmasındaki amaç ise, lif açma işleminde hangi parametrenin daha etkili olduğunu tespit etmektir. Sürekli hava basıncının uygulanması durumunda kompresör tabancasından su çıkışının olması ihtimali söz konusu olabilmektedir. Cam elyafı amorf karakterlidir [22] ve suyu bünyesinde tutma kabiliyeti sayesinde yapısındaki fibrillerin birbirine tutunma oranı artacaktır. İlave olarak PET bidonun içerisinde oluşan basınç farkından dolayı çatlama riski söz konusu olabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı hava basıncı belirli aralıklarla uygulanmıştır. Basıncı hava uygulanması sonucu açılan liflerin lif açma süreleri Tablo 5 de verilmektedir.

Tablo 5. Kullanılan cam elyafların lif açma süreleri

Elyaf tipi	Bidon içerisine uygulanan basınç süresi	Basınç uygulanmadan beklenen süre	50 g lifi açmak için harcanan toplam süre
PP ₄ (4,5 mm/13 μ)	3 dk	1-2 dk	40-45 dk
PH ₂ (3 mm/13 μ)	3 dk	1-2 dk	70-75 dk
PBT ₂ (4,5 mm/10,5 μ)	3 dk	1-2 dk	55-60 dk

Kullanılan cam elyaf türlerinin lif boy/çap oranı PP_4 , PBT_2 ve PH_2 için sırasıyla 346.153, 428.571 ve 230.769 olarak hesaplanmıştır. Lif açma süresi en uzun ve en kısa olan cam elyaf tiplerinin ise sırasıyla PH_2 ve PP_4 olduğu görülmektedir. Buna göre lif açma işlem süresi ile lif boy/çap oranı arasında tutarlı bir ilişki gözlenmemiştir. PP_4 ve PBT_2 liflerinin lif açma sürelerinin daha kısa olduğu dikkate alındığında, PP_4 ve PBT_2 liflerinin lif boylarının PH_2 ye göre daha uzun olduğu göze çarpmaktadır. Bu durum lif açma işleminde, lif boyunun uzun olmasının işlem süresini kısalttığı şeklinde yorumlanmaktadır. Diğer yandan PP_4 ve PH_2 liflerinin lif çaplarının 13 μ olduğu ve lif açma sürelerinin arasındaki farkın büyük olduğu dikkate alındığında, lif açma işlemi için lif boyunun lif çapına göre daha etkin bir parametre olduğu ortaya çıkmaktadır. Kısacası PP_4 lifinin hızlı açılması, öncelikle lif boyunun uzun olması sonrasında ise kalın lif çapına sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

Basınçlı hava uygulamasının lif boyu üzerindeki etkisi, direkt ölçüm yöntemiyle kalitatif olarak incelenmiştir [23]. Açılmış elyaf demedinden alınan bir adet fibril, mikroskop altında kırılmış haldeki formuyla kıyaslanmış ve bu kıyaslama her bir cam elyaf tipi için 5 kez tekrarlanmıştır. Cam elyaf tipine göre, kırılmış ve açılmış liflerin boyları arasında fark olmadığı ve basınçlı hava uygulamasının lif boyunda herhangi bir değişime neden olmadığı tespit edilmiştir. Kompozit malzeme üretimi esnasında lif boyundaki gözlemlenebilecek yıpranma ya da değişimin işlem, işlem parametreleri, malzeme seçimi ve kalıp tasarımından kaynaklanabileceği bilinmektedir [24]. Kısa lif takviyeli kompozit malzeme üretimi esnasında yüksek basınç değerlerinin uygulanmasının lif boyu üzerinde değişime neden olduğu rapor edilmiştir [25]. Lif açma işlemine dair literatürde bir veri olmamasından dolayı, lif boyunda herhangi bir değişimin olmamasının çalışmada uygulanan düşük basınç değerinden kaynaklandığı kanısına varılmıştır. Kompozit malzeme üretiminin, hazırlanan kalıplar üzerinde elle yatırma yöntemiyle yapılması ve oda sıcaklığında sertleşme sağlanması gibi etkenler düşünüldüğünde son ürünün içerdiği lif boyunda da herhangi bir değişimin olmaması beklenmektedir.

3.2. Çekme dayanımı testi

Şekil 5 de numunelerin çekme dayanımları örneklenmiştir. Kırılmış cam elyaf takviyeli numuneler arasında en yüksek çekme dayanımı 28.46 MPa ile %5 PH_2 ve en düşük çekme dayanımı 8.34 MPa ile %5 PP_4 takviyesi ile elde edilmiştir. Özsoy ve ark. (2017) kırılmış lif takviyeli kompozitlerde takviye oranı arttıkça çekme dayanımının azaldığını rapor etmişlerdir [26]. Kırılmış cam elyaf takviyeli kompozitlerde, PH_2 için takviye oranı arttıkça çekme dayanımının arttığı görülmektedir. PH_2 ve PP_4 liflerinin lif çaplarının 13 μ ancak lif boylarının sırasıyla 3 mm ve 4.5 mm olduğu dikkate alındığında uzun lif boyunun takviye oranındaki artışla çekme dayanımını artırdığı tespit edilmiştir. Kısa lif boyuna sahip PH_2 ile takviyelendirilmiş kompozitlerin çekme dayanımının yüksek çıkması ise literatür ile

uyumlu bulunmuştur [27]. Kırılmış PBT_2 (4.5 mm/10.5 μ) takviyesinde çekme dayanımı ve takviye oranı arasında lineer bir bağlantı gözlenmemiştir.

Açılmış cam elyaf takviyeli kompozitlerde ise lif açma işleminin, PH_2 takviyeli kompozitlerin çekme dayanımında düşüşe neden olduğu tespit edilmiştir. PP_4 ile takviye oranı arttıkça çekme dayanımının azaldığı ancak kırılmış %15 PP_4 ile elde edilen çekme dayanımının (11.74 MPa) açılmış %5 PP_4 (11.68 MPa) ile benzer olduğu görülmektedir. Lif açma işlemi PP_4 için daha düşük konsantrasyonda yüksek çekme dayanımı sergilenmesine neden olmuştur. Açılmış PBT_2 takviyesi ile çekme dayanımı ve takviye oranı arasında lineer bir bağlantı gözlenmemiş ve kırılmış PBT_2 çekme test sonuçlarına göre kısmi bir düşüş tespit edilmiştir.

3.3. Eğilme dayanımı testi

Lif açma işlemi, kompozit malzemelerin eğilme dayanımının genel anlamda azalmasına neden olmuştur. Kırılmış cam elyaf takviyeli kompozitlerde en yüksek eğilme dayanımı %15 PH_2 (66.13 MPa) ve %5 PH_2 (57.64 MPa) numunelerinde iken açılmış cam elyaf takviyeli kompozitlerde ise %15 PH_2 (60.26 MPa) ve %5 PBT_2 (51.66 MPa) numunelerinde ölçülmüştür. Omit ve ark. (2012) kırılmış cam elyaf takviyeli kompozitlerde takviye oranı arttıkça eğilme dayanımının azaldığını ancak lif uzunluğu azaldıkça eğilme dayanımının arttığını ifade etmişlerdir [28]. Bu durum PBT_2 ve PP_4 liflerinin lif boylarının 4.5 mm olduğu dikkate alındığında kırılmış elyaf takviyeli kompozitlerde eğilme dayanımlarının PH_2 den düşük çıkmasını açıklar niteliktedir. Yıldızel (2017) cam elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik dayanımlarını incelediği çalışmada düşük kırılma boyuna sahip kompozitlerde daha iyi mekanik özelliklerin elde edildiğini rapor etmiştir [27]. Bu durum ise 3 mm kırılma boyuna sahip PH_2 takviyeli kompozitlerin eğilme dayanımının diğer numunelerden yüksek çıkmasını açıklamaktadır.

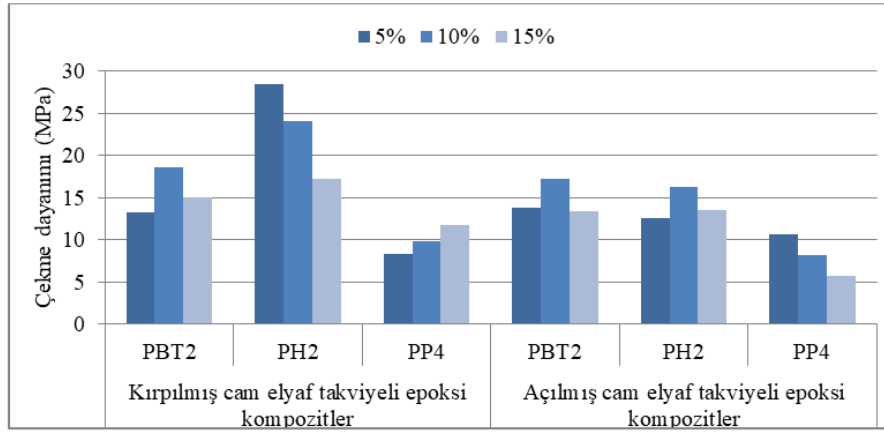
Lif açma işlemi, PH_2 için takviye oranı arttıkça eğilme dayanımında artışa ancak PP_4 için takviye oranı arttıkça eğilme dayanımının azalmasına neden olmuştur. Lif çapları aynı olan bu liflerin lif uzunluklarının sırasıyla 3 mm ve 4.5 mm olduğu dikkate alındığında lif boyunun eğilme dayanımı üzerindeki etkisinin yüksek olduğu görülmektedir. Açma işlemi sonrasında, farklı lif boy/çap oranına sahip PH_2 ve PBT_2 liflerinin eğilme dayanımı davranışlarının daha tutarlı hale geldiği tespit edilmiştir. Şekil 6 numunelerin eğilme kuvvetleri altında davranışlarını göstermektedir.

3.4. Isıl iletkenlik testi

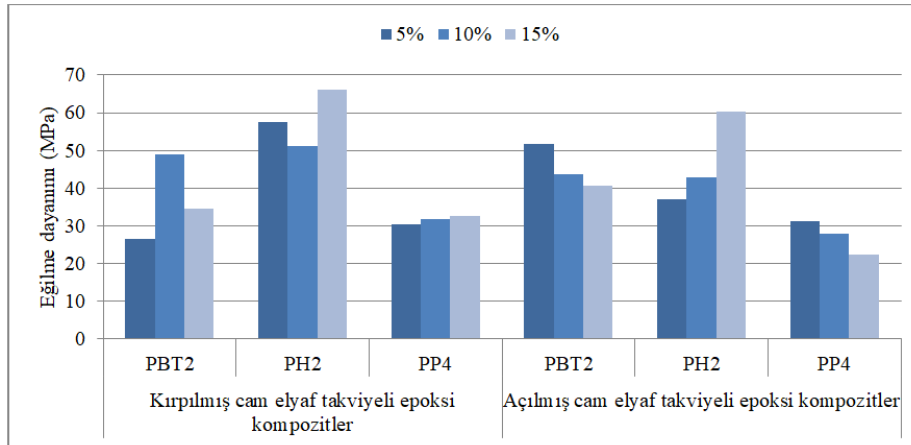
Şekil 7 de numunelerin ısı iletim katsayıları gösterilmektedir. Kırılmış cam elyaf takviyeli kompozitlerde en yüksek ısı iletim katsayısı %10 PP_4 kompozitlerde 0.2464 W/mK olarak ölçülmüştür. Lif açma işleminin ısı iletim katsayısının düşmesinde etkili olduğu görülmektedir. Isıl iletim katsayısının, açılmış lif kullanımı ile %10 PP_4 numunelerinde 0.2464 W/mK değerinden

0.1992 W/mK değerine düştüğü tespit edilmiştir. Açılmış lif takviyeli kompozitlerde en düşük ısı iletim katsayısı ise 0.1664 W/mK değeriyle %5 PP₄ numunelerinde ölçülmüştür. PP₄ ve PH₂ liflerinde açılmış lif takviye oranı arttıkça ısı iletim katsayısı artmakta ancak bu liflerin kırılmış lif takviyelen-

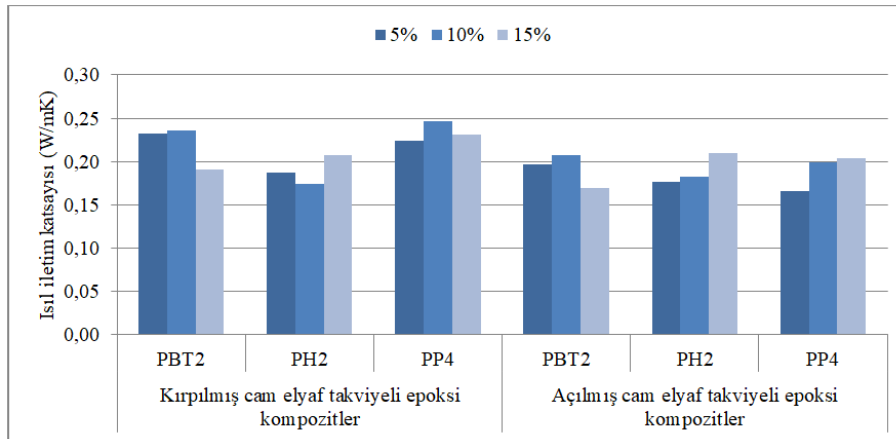
dirmelerinde takviye oranı ile ısı iletim katsayısı arasında lineer bir bağlantı saptanamamıştır. Açılmış PBT₂ takviyesi ile ısı iletim katsayısı ve takviye oranı arasında lineer bir bağlantı gözlenmemiş ve kırılmış PBT₂ takviyeli numunelerin ısı iletim katsayılarına göre kısmi bir düşüş tespit edilmiştir.



Şekil 5. Kompozitlerin çekme dayanımları



Şekil 6. Kompozitlerin eğilme dayanımları



Şekil 7. Kompozitlerin ısı iletkenlik katsayıları

Lampman (2003) takviyesiz epoksi reçinenin ve ağırlıkça %40-60 oranında kırılmış cam elyafı ile takviyelendirilmiş sıcak pres yöntemiyle üretilen epoksi kompozitin ısı iletkenlik değerlerinin sırasıyla 0.17-0.20 W/mK ve 0.17-0.40 W/mK aralıklarında olduğunu rapor etmiştir [29]. Bu çalışmada ağırlıkça %5-15 oranında kırılmış cam elyafı ile takviyelendirilmiş epoksi kompozitlerin ısı iletkenlik değerlerinin 0.1743-0.2464 W/mK ve açılmış cam elyafı takviyeli kompozitler için ise 0.1664-0.2086 W/mK aralığında olduğu tespit edilmiştir. Açılmış cam elyaf takviyesi ısı iletim katsayısı aralığının düşmesine ve malzemenin daha yalıtkan karakteristiğe bürünmesine neden olmuştur. PBT₂ ve PP₄ takviyeli kompozitler incelendiğinde, açma işlemi sayesinde ısı iletim katsayılarında farklı orandaki takviyelendirmelerde keskin bir düşüş olduğu görülmektedir. 4.5 mm kırma boyuna sahip olan bu liflerin lif çaplarının PBT₂ ve PP₄ için sırasıyla 10.5 µ ve 13 µ olduğu, geniş lif çapına sahip olan PP₄ lifinin kırılmış numunelerinde ısı iletim katsayılarının yüksek ancak açılmış lif takviyeli olanlarında ise düşük çıkması söz konusu olmuştur. Sabit lif uzunluğu ve lif hacminde lif çapı azalır ise toplam lif/matris arayüz alanı artmaktadır [30]. Açma işlemi geniş çaplı PP₄ cam elyafının dağılmasına bu da arayüz alanının artmasına neden olmakta bu durum ısı iletim katsayısının açılmış liflerde düşük çıkmasını açıklamaktadır.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Çalışmada farklı kırma boyuna ve lif çapına sahip cam elyaf-ları basınçlı hava uygulaması ile demet haline getirilmiştir. Ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında kırılmış ve açılmış cam elyaf lar epoksi matrisin takviyelendirilmesinde kullanılmış ve elde edilen karışımlar elle yatırma yöntemiyle ilgili standartlarda belirlenen ölçülerde hazırlanan kalıplara dökülerek oda sıcaklığında sertleşme sağlanmıştır. Farklı lif boy/çap oranına sahip kompozitlerin mekanik ve ısı özellikleri test edilmiştir.

Lif açma işleminin PET bidon içerisinde yapılmasının, basınçlı hava uygulaması ile kap içerisindeki statik elektriklenme oluşumuna katkı sağladığı tespit edilmiştir. Açılan cam elyafının hacimli bir yapıya sahip olmasından dolayı PET bidon içerisine düşük miktarda kırılmış lif konulması gerekmektedir. Hava basıncının uygulanması esnasında kompresör tabancasından su çıkışının olması, cam elyafının amorf karakteristiğinden dolayı oluşan nemi absorbe etmesi ve PET bidonun çatlaması ihtimallerinden dolayı hava basıncının kademeli olarak uygulanması zorunluluk arz etmektedir. Cam elyafın amorf karakteristiğinin lif açma süresinin uzamasında etkili olduğu tespit edilmiştir.

Lif açma işleminde, lif boyunun lif çapına nazaran daha önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Uzun lif boyuna ve geniş lif çapına sahip olan PP₄ (4.5 mm/13 µ) cam elyaf tipinin basınçlı hava uygulamasına daha hızlı cevap verdiği tespit edilmiştir. Kısa kırma boyuna ancak geniş lif çapına sahip PH₂ (3 mm/13 µ) kırılmış elyaf tipinin ise lif açma süresinin daha

uzun olduğu görülmüştür. Lif açma işlem süresi ile lif boy/çap oranı arasında tutarlı bir ilişki gözlenmemiştir.

Lif açma işlemine tabi tutulan 3 farklı kırma boyuna ve lif çapına sahip cam elyaf larının özellikleri incelendiğinde, PH₂ (3 mm/13 µ) tipi kırılmış cam elyafının bağlayıcı miktarının % 0.90±0.15 olduğu ve diğer cam elyaf tipleri olan PP₄ (4.5 mm/13 µ) ve PBT₂ (4.5 mm/10.5 µ) için bu miktarların sırasıyla % 0.65±0.10 ve % 0.60±0.12 olduğu görülmektedir. Çalışmada kullanılan cam elyaf tiplerinin bağlayıcı miktarlarındaki bu farklılık, düzelerden çıkan PH₂ monofilamentlerinin direkt olarak multifilament halde toplanmadan bağlayıcı ajan ile işleme tabi tutulmasından kaynaklanmaktadır. PP₄ ve PBT₂ monofilamentleri ise multifilament forma dönüştükten sonra bağlayıcı ajanla kaplanmaktadır. Bu bağlamda, kırılmış haldeki PH₂ multifilamenti oluşturan monofilamentler arasındaki arayüz bağının, PP₄ ve PBT₂ cam elyaf tiplerine göre kuvvetli olması beklenmektedir. PH₂ cam elyaf tipinin lif açma işleminin diğer cam elyaf tiplerinden uzun sürmesi, kısa kırma boyuna sahip olmasının yanı sıra bağlayıcı ajan miktarının fazla olmasından da kaynaklanmaktadır. Üretilen kompozit numunelerin mekanik ve ısı performansları açısından değerlendirme yapılmak istendiğinde, kırılmış elyaf takviyeli kompozitler arasında en yüksek çekme ve eğilme dayanımının ve en düşük ısı iletim katsayısının PH₂ takviyeli numunelerde elde edildiği görülmektedir. Bu bağlamda lif boy/çap oranı kadar bağlayıcı miktarının da kompozit malzemenin mekanik dayanım ve ısı iletim katsayısı üzerinde etkili olduğu görülmektedir.

Genel anlamda lif açma işlemi kompozitlerin mekanik dayanımların azalmasına neden olmuştur. Lif açma işlemi PBT₂ (4.5 mm/10.5 µ) elyafı ile takviyelendirilmiş kompozit malzemeler dikkate alındığında, %5 lik takviyelendirme için kompozit malzemenin çekme dayanımının yaklaşık %50 oranında azalmasına neden olmuştur. Kırılmış cam elyaf takviyeli kompozitlerde lif çapları aynı olması durumunda, uzun lif boyunun takviye oranındaki artışla çekme dayanımını artırdığı tespit edilmiştir. Lif açma işlemi PP₄ için daha düşük konsantrasyonda yüksek çekme dayanımı sergilenmesine neden olmuştur. Lif açma işlemi, kompozit malzemelerin eğilme dayanımının genel anlamda azalmasına neden olmuştur. Lif boyunun eğilme dayanımı üzerindeki etkisinin yüksek olduğu görülmektedir. Açma işlemi sonrasında, farklı lif boy/çap oranına sahip PH₂ ve PBT₂ liflerinin eğilme dayanımı davranışlarının daha tutarlı hale geldiği tespit edilmiştir. Lif açma işleminin ısı iletim katsayısının düşmesinde etkili olduğu ve kompozitlerin daha yalıtkan karakteristik özellik sergilemesine sebep olduğu görülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK 1002 Hızlı Destek Programı Mühendislik Araştırma Grubu tarafından 214M280 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Panthapulakkal, S., Raghunanan, L., Sain, M., Birat, K.C., Tjong, J., (2017), *Natural Fiber and Hybrid fiber Thermoplastic Composites: Advances in Ligthweighting Applications*, In Green Composites, C. Baillie, R. Jayasinghe (Edt), Woodhead Publishing, Cambridge.
2. Nair, A.B.; Joseph, R., (2014), *Eco-friendly Bio-Composites Using Natural Rubber (NR) Matrices and Natural Fiber Reinforcements*, In Chemistry, Manufacture and Applications of Natural Rubber, S. Kohjiya, Y., Ikeda (Edt), Woodhead Publishing, Cambridge.
3. Agarwal, B.D., Broutman, L.J., Chandrashekara, K., (2017), *Analysis and Performance of Fiber Composites*, John Wiley & Sons, Hoboken.
4. Kurt, G., (2006), *Lif İçeriği ve Su/Çimento Oranının Fibro Betonun Mekanik Davranışına Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
5. Şahin, Y., (2006), *Kompozit Malzemelere Giriş*, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
6. Zinck, P., Mäder, E., Gerard, J.F., (2001), *Role of Silane Coupling Agent and Polymeric Film Former for Tailoring Glass Fiber Sizings from Tensile Strength Measurements*, Journal of Materials Science, 36, 5245-5252.
7. Prakash, S., (2019), *Experimental Investigation of Surface Defects in Low-Power CO₂ Laser Engaving of Glass Fiber-Reinforced Polymer Composite*, Polymer Composites. 40, 4704–4715.
8. Trantina, G., Mimmer, R., (1994), *Structural Analysis of Thermoplastic Components*, McGraw Hill, New York.
9. Ekşi, O., (2007), *Plastik Esaslı Malzemelerin Isıl Şekil Verme Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne, Türkiye.
10. Mallick, P.K., (2007), *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design*, Marcel Decker Incorporated Publishing, New York.
11. Lee, H., Neville, K., (1957), *Epoxy Resins: Their Application and Technology*, Mc Graw-Hill, New York.
12. Peck, J., (2007), *Sculpture as Experience*, Krause Publications, Wisconsin.
13. Hancock, P., Cuthbertson, R.C., (1970), *The Effect of Fibre Length and Interfacial Bond in Glass Fibre-Epoxy Resin Composites*, Journal of Materials Science, 5, 762-768.
14. Kinsella, M., Murray, D., Crane, D., Mancinelli, J., Kranjc, M., (2001), *Mechanical Properties of Polymeric Composites Reinforced with High Strength Glass Fibers*, International SAMPE Technical Conference, 33(1), 1644-1657.
15. Thomason, J.L., (2002), *The Influence of Fiber Length and Concentration on the Properties of Glass Fiber Reinforced Polypropylene: Injection Moulded Long and Short Fiber PP*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 33(12), 1641–1652.
16. Obukuro, M., Takahashi, Y., Shimizu, H., (2008), *Effect of Diameter of Glass Fibers on Flexural Properties of Fiber Reinforced Composites*, Journal of Dental Materials, 27 (4), 541-548.
17. Bagherpour, S., (2012) *Fiber Reinforced Polyester Composites*, In Polyester, H. El-Din, M.S. Croatia (Edt), Intech Open Access Publication.
18. Mader, E., (2017), *Glass Fibers: Quo Vadis?*, Fibers, 5(10), 1-4.
19. ASTM D3039, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
20. EN ISO 178:2003, Plastics: Determination of Flexural Properties.
21. ASTM C1113, Standard Test Method for Thermal Conductivity of Refractories by Hot Wire (Platinum Resistance Thermometer Technique).
22. Chawla, K.K., (2016), *Glass Fibers*, In Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, S. Hashmi (Edt), Elsevier, Amsterdam.
23. Mark, R.E., Borch, J., Habeger, C., (2002), *Handbook of Physical Testing of Paper*, CRC Press, New York.
24. Goris, S., Back, T., Yanev, A., Brands, D., Drummer, D., Osswald, T.A., (2018), *A Novel Fiber Length Measurement Technique for Discontinuous Fiber-Reinforced Composites: A Comparative Study with Existing Methods*, Polymer Composites, 39 (11), 4058-4070.
25. Metten, M., Cremer, M., (2000), *Langfaserverstärkte Thermoplaste Spritzgießen: Verfahrensparameter Beeinflussen die Faserlänge*, Kunststoffe Plast Europe, 90(1), 80-83.
26. Ozsoy, N., Ozsoy M., Mimaroglu, A., (2017), *Mechanical and Tribological Behaviour of Chopped E-Glass Fiber-Reinforced Epoxy Composite Materials*, Acta Physica Polonica A, 132, 832-856.
27. Yıldız, S., (2017), *Mechanical and Thermal Behaviors Comparison of Basalt and Glass Fibers Reinforced Concrete with Two Different Fiber Length Distributions*, Challenge Journal of Structural Mechanics, 3(4), 155–159.
28. Omid, T., Venus, M., Sharafeddin, F., Asghar, A., (2012), *Effect of Glass Fiber Length on Flexural Strength of Fiber-reinforced Composite Resin*, World Journal of Dentistry, 3, 131-135.
29. Lampman, S., (2003), *Characterization and Failure Analysis of Plastics*, ASM International, Ohio.
30. Lee, S.M., (1992), *Handbook of Composite Reinforcements*, John Wiley & Sons, New York.