Epoksi Esaslı Kenevir Lif ile Güçlendirilmiş Kompozitlerin Özelliklerinin İncelenmesi

Gökhan UĞURER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2022

Examination of Properties of Composites Strenghtened With Epoxy-Based Hemp Fibers

Gökhan UĞURER

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Chemical Engineering

January 2022

Epoksi Esaslı Kenevir Lif ile Güçlendirilmiş Kompozitlerin Özelliklerinin İncelenmesi

Gökhan UĞURER

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Proses ve Reaktör Tasarım Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Alime ÇITAK

Ocak 2022

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Alime ÇITAK danışmanlığında hazırlamış olduğum "Epoksi Esaslı Kenevir Lif ile Güçlendirilmiş Kompozitlerin Özelliklerinin İncelenmesi" başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimizi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.

14/01/2022

Öğrencinin Adı Soyadı

Gökhan Uğurer

İmza

ÖZET

Dünya nüfusunun günden güne hızlı artışı, küreselleşme ve sanayileşme ile enerji ihtiyacı gittikçe artmaktadır. Doğal lifler çevreye duyarlı, yenilenebilir, kolay bulunabilirlik, üretim proseslerinde makinelere dezavantaj göstermemesi, düşük yoğunluk ve yanma sırasında düşük kalıntı ve daha az zararlı gaz oluşumu gösterirler. İnşaat yapı malzemelerinde bitki bazlı kompozit malzemelere yönelik üretimler hız kazanmıştır. Bu tez çalışmasında, Samsun Vezirköprü ilçesinden temin edilen kenevir elyaf kullanılarak hazırlanan epoksi bazlı biyokompozit malzemelerin sentezi amaçlanmıştır. Kenevir elyafları sırasıyla izoproil alkol/su, alkalizasyon, asetilasyon ve silanizasyon ile yüzey geliştirme işlemlerine tabii tutulmuştur. Kompozit malzemede kenevir lifi takviye fazını, epoksi reçine ise matris fazını oluşturmaktadır. Kompozit malzemelerin üretiminde elle yatırma metodu kullanılmıştır. Malzemelerin lif oranları ağırlıkça %5, 10, 20 ve 33,3 olarak seçilmiştir. Ağırlıkça %10 kenevir lif takviyeli kompozit malzemede amonyum polifosfat kullanarak yanma hızı test edilmiş ve alev geciktirici katkısı ile yanma hızının düştüğü hatta bir süre sonra alevin söndüğü gözlemlendi. Sentezlenen biyokompozit malzemelerin eğilme ve basınç dayanımları, vakumlu su emme, ses yutum katsayısı ve ısı iletkenlik katsayısı gibi özellikleri incelenmiştir. Eğilme dayanımında en yüksek değer (59,1 N/mm^2) %20, basınç dayanımında en yüksek değer (216,72 N/mm^2) %33,3, vakumlu su emme testinde en düşük su emme yüzdesi 0,08 ile %5 lif içerikli kompozit malzemesinde görülmüştür. 1250 Hertz frekansında 0,68 ses yutum katsayısı ile %10 ve %20'lik ve termal iletkenlik katsayısında 0,256 W/mK değeriyle %5 lif içerikli kompozit malzeme en iyi sonuçları vermiştir. Kenevir lif takviyeli epoksi kompozitlerin üretimi ve kenevir liflerinin yüzey geliştirme işlemlerini kombine olarak ele alan ve aynı zamanda epoksi reçine ile bir biyokompozit malzemesi üretimine rastlanmamıştır.

Anahtar kelimeler: Kompozit malzemeler, kenevir lifi, elle yatırma metodu, biyokompozit, mekanik dayanım.

SUMMARY

With the rapid increase in the world population, globalization and industrialization, the need for energy is also increasing. Natural fibers are environmentally friendly, renewable, easy to find, harmless to production machinery, low density and low residue and less harmful gas formation during combustion. Production for plant-based composite materials in construction building materials has accelerated. In this thesis, it is aimed to synthesize epoxy-based biocomposite materials by using hemp fiber obtained from Samsun Vezirköprü district. The hemp fibers were subjected to surface development processes with isoproyl alcohol/water, alkalization, acetylation and silanization, respectively. Hemp fiber constitutes the reinforcement phase and epoxy resin constitutes the matrix phase. The manual lay-up method was used in the production of composite materials. The fiber ratios of the materials were chosen as 5, 10, 20 and 33.3 by weight. The burning rate was tested by using ammonium polyphosphate in 10% by weight hemp fiber reinforced composite material and it was observed that the burning rate decreased with the flame retardant additive and even the flame went out after a while. The properties of the synthesized biocomposite materials such as bending and compressive strength, vacuum water absorption, sound absorption coefficient and thermal conductivity coefficient were investigated. The highest value in bending strength (59.1 N/mm^2) 20%, the highest value in compressive strength (216.72 N/mm^2) 33.3%, the lowest water absorption percentage in vacuum water absorption test 0.08 to 5% fiber observed in the composite material. Composite material containing 5% fiber with a sound absorption coefficient of 10% and 20% at a frequency of 1250 Hertz and a value of 0.256 W/mK at a thermal conductivity coefficient gave the best results. No production of a biocomposite material with epoxy resin has been encountered, which combines the production of hemp fiber reinforced epoxy composites and the surface improvement processes of hemp fibers, at the same time.

Keywords: Composite materials, hemp fiber, hand lay-up method, biocomposite, mechanical strength.

TEŞEKKÜR

Çalışma boyunca ilgisini, zamanını ve desteğini eksik etmeyen sevgili danışmanım Doç. Dr. Alime ÇITAK'a, kimyasal ihtiyacım doğrultusunda numune gönderimi sağlayan (Nanokim Kimya San. ve Tic. Ltd. Şti.) sayın Kemal Emre ÇECE'ye, alev dayanım testi, ses yutum katsayısı ve vakumlu su emme testlerini gerçekleştiren (Formplast Yalıtım Bantları İnş. San. Ve Tic. Ltd. Şti.) Hatice KAYA UYSAL'a, eğilme ve basınç testlerinin gerçekleştiren (Akdeniz Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü) Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL ve Arş. Gör. İbrahim YETİŞ'e, ısı iletim katsayılarının testini gerçekleştiren (Eskişehir Teknik Üniversitesi Seramik Araştırma Merkezi) Mustafa ÇOBANCI'ya, kenevir liflerini numune olarak sağlayan Haldun BABACAN'a, deneylerde kullandığım çelik döküm kalıbı ödünç veren (Başergün Boya ve Kimya İnş. San. Tic. A.Ş) Orhan KOÇER ve Şahin YILAN'a, hayatımın her akışında benimle beraber olan annem Arap Ayşe UĞURER ve babam Ayhan UĞURER'e, destekleyen ve motive etmek için ayrı çaba gösteren ablam Gamze UĞURER ve kardeşim Gizem UĞURER'e, son olarak tüm arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **vi**
SUMMARY ..... **vii**
TEŞEKKÜR ..... **viii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xii**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xv**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xvi**
1. GİRİŞ VE AMAÇ **1**
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **4**
3. TEORİK BİLGİ **9**
3.1. Yalıtım ve Yalıtım Türleri 9
3.1.1. Isı yalıtımı 9
3.1.2. Ses yalıtımı 10
3.1.3. Alev geciktiriciler 11
3.1.4. Su yalıtımı 13
3.2. Yalıtım Malzemesi Türleri 14
3.2.1. İnorganik yalıtım malzemeleri 15
3.2.2. Organik yalıtım malzemeleri 18
3.2.2.1. Petrokimyasal malzemeler 18
3.2.2.2. Yenilenebilir (Doğal) malzemeler 19
3.3. Doğal Liflerin Kullanım Alanları 20
3.4. Kenevir Lifi 25
3.4.1. Kenevir liflerinin biyokimyasal özellikleri 27
3.4.2. Kenevir liflerinin kimyasal özellikleri 28
3.4.3. Kenevirin fiziksel özellikleri 32
3.4.4. Kenevir sapından lif eldesi 34
3.4.4.1. Elyaf çıkarma 36
3.4.5. Kenevir liflerinin yüzey geliştirme yöntemleri 38
3.4.5.1. Fiziksel yüzey geliştirme yöntemleri 38
3.4.5.2. Kimyasal yüzey geliştirme yöntemleri 39
3.5. Kompozit Malzemeler 41

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.5.1. Matris malzemeleri....42
3.5.1.1. Polimerik matris malzemeleri....42
3.5.1.2. Seramik matris malzemeleri....44
3.5.1.3. Metal matris malzemeleri....44
3.5.2. Fiber takviyeleri....45
3.5.2.1. Sentetik fiber takviyeleri....45
3.5.2.2. Doğal fiber takviyeleri....46
3.6. Kompozit Malzemelerinin Üretim Metotları....46
3.6.1. Elle yatırma yöntemi ile kompozit malzeme üretimi....47
3.6.2. Vakum torbalama ile kompozit malzeme üretimi....47
3.6.3. Vakum infüzyon ile kompozit malzeme üretimi....48
3.6.4. Pultrüzyon ile kompozit malzeme üretimi....49
3.6.5. Hidrolik ve mekanik pres yöntemi ile kompozit malzeme üretimi....50
3.7. Yapı Malzemelerine Yapılan Analizler....51
3.7.1. Ses yutum katsayısı....51
3.7.2. Üç noktalı eğilme dayanımı....54
3.7.3. Isı iletim katsayısı....57
3.7.4. Su emme yüzdesi....58
4. MATERYAL VE YÖNTEM....59
4.1. Kullanılan Kimyasallar ve Materyaller....59
4.2. Deneysel Yöntem....61
4.2.1. Demineralize su ile yıkama....61
4.2.2. İzopropil alkol / su ile yıkama....62
4.2.3. Alkalizasyon....62
4.2.4. Nötralizasyon....63
4.2.5. Silanizasyon....63
4.3. Kompozit Malzeme Üretimi....64
4.4. Elde Edilen Kompozit Malzemelerin Karakterizasyon Çalışmaları....69
5. BULGULAR VE TARTIŞMA....71
5.1. Eğilme Dayanım Test Sonuçları....71
5.2. Basınç Dayanım Test Sonuçları....83
5.3. Yanma Hızı Test Sonuçları....85
5.3.1. Kenevir elyaf ve epoksi reçine matrisli malzeme....86

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5.3.2. Kenevir elyaf ve APP takviyeli epoksi reçine matrisli malzeme 86
5.4. Ses Yutum Katsayısı 87
5.5. Vakumlu Su Emme 92
5.6. Isı İletim Katsayısı 93
5.7. Yoğunluk Tayini 101
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....102
KAYNAKLAR DİZİNİ.....104
EK AÇIKLAMALAR.....110
Ek Açıklama-A: Empedans Tüpü ile Ses Yutum Katsayısı Analiz Raporları.....110
Ek Açıklama-B: Devotrans Vakumlu Su Emme Cihazı ile Yüzdece Su Emme Analiz Raporları 111
Ek Açıklama-C.1: Yanmazlık Test Analiz Raporları 112
Ek Açıklama-C.2: Yanmazlık Test Analiz Raporu.....113
Ek Açıklamalar-D.1: %10 Lif içerikli kompozit malzemenin eğilme dayanımı. 114
Ek Açıklamalar-D.2: %30 Lif içerikli kompozit malzemenin eğilme dayanımı 119

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

2.1. Malzemelerin ısıl performansları (a) R1 ve R2 tek katmanlı 5
3.1. Ses yalıtımı ve ses absorpsiyonu. 11
3.2. Yapı yalıtım malzemelerinin yangına tepki sınıflandırması. 11
3.3. Yapı yalıtım malzemelerinin sınıflandırılması (Durakovic vd., 2020).....14
3.4. Perlit kayasının kimyasal bileşimi (Arslan ve Aktaş, 2018). 16
3.5. Ford'un kenevir lifi ile geliştirmiş olduğu otomobil (Kaya ve Öner, 2020).....20
3.6. Kenevir lifi ile üretilen bir otomobil kapısı (Peças vd., 2018). 21
3.7. Kenevir bitkisine ait kısımların farklı sektörlerde kullanımı (Karche ve Singh, 2019).....26
3.8. Kenevir bitkisine bağlı olarak en çok elde edilen kannabinoidler (Karche ve Singh, 2019). 28
3.9. Selülozun mikro yapısı (Bulut ve Erdoğan, 2011).....29
3.10. Glikoz monomerlerinden oluşan selüloz molekülü. Paralel selüloz zincirleri, kristalli mikrofibrillerle sonuçlanan hidrojen bağları oluşturur (Thomsen vd., 2005). 30
3.11. Odunsu olmayan liflerdeki (otlar) hemiselülozun yapısı 4-O-metil glukuronik aside a-1,2 bağı ile asetillenmiş ksilen zinciri (sol yan grup) ve aynı zamanda fenolik aside bağlı olan L-arabinofuranoza α-1,3 bağı ile (sağ taraf grubu) gösterilmiştir (Thomsen vd., 2005).....31
3.12. Lignin molekülü, muhtemelen her zaman değişken olan karmaşık bir yapıya sahiptir (Thomsen vd., 2005). 31
3.13. Tek lifi, ikincil hücre duvarını ve son olarak hücre duvarı lamelini yakınlaştıran enine kenevir kök bölümünün modeli (Nunes, 2017). 33
3.14. Kenevir lifinin yapısı: (a) enine kenevir sapı bölümü, (b) kenevir lifi demetinin enine kesit morfolojisi ve (c) kenevir temel lifinin şematik gösterimi (Manaia vd., 2019). 34
3.15. Uzun lifli kenevir üretim akış şeması ve ortalama verimler (Horne, 2020). 37
3.16. Plazma yüzey işleme yönteminin genel şematik gösterimi (Ferreira, 2019). 38
3.17. Asetik anhidritin fonksiyonel doğal lif gruplarıyla reaksiyonu (Ferreira, 2019). 40
3.18. Alkali muamele reaksiyonu ve sonrasında fiberlerin benzoil klorür ile arasındaki reaksiyon (Ferreira, 2019).....40
3.19. Elle yatırma yöntemi ile kompozit üretim metodu (Sapuan, 2017). 47
3.20. Vakum torbalama ile kompozit üretiminin şematik gösterimi (Durgun vd., 2014).....48
3.21. Vakum infüzyon ile kompozit üretiminin şematik gösterimi (Durgun vd., 2014). 49
3.22. Pultrüzyon işleminde reçine banyosunda polimer emdirilmiş sürekli lifler (Sapuan, 2017). ..50
3.23. Sıkıştırma kalıplama ile kompozit üretiminin şematik gösterimi (Park ve Lee, 2012). 50

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

3.24. Empedans tüpü ile ses yutum katsayısı ölçüm ekipmanları. 52
3.25. Empedans tüpü ile ses yutum katsayısının 29mm çapındaki ölçüm ekipmanı. 53
3.26. Ses yutum katsayısnın belirlenmesinde kullanılan kenevir lif takviyeli epoksi kompozit malzeme. 53
3.27. Üç noktalı eğme deney düzeneği (BTÜ, 2016). 55
3.28. Üç noktalı eğilme gerilmesi test cihazı ve cihaza yerleştirilen kompozit malzeme (test numunesi). 55
3.29. Üç noktalı eğilme testi için hazır test aparatı. 56
4.1. Kompozit malzeme sentezinde kullanılacak kalıplar 60
4.2. Kompozit malzeme sentezinde kullanılacak bir kalıp ve elle yatırma yöntemi için gerekli araç **(a)** Tahta kalıp (50x50x18mm) **(b)** Elyaf laminasyon rulosu…….……60
4.3. Elle yatırma yönteminde hava kabarcıklarını almak için kullanılan araçlar 60
4.4. Lifler üzerine uygulanan fiziksel ve kimyasal safsızlıkların giderimi için aşamalar. 61
4.5. Farklı bitkilerin kimyasal kompozisyonları 63
4.6. APP katkılı kompozit malzemenin (kalıp boyutu: 356x100x13mm) oda koşullarında kürlenme süreci. 67
4.7. Alev geciktirici katkılı kompozit malzemenin elle yatırma metoduna göre üretimi. 67
5.1. KE10 kompozit malzemesinin eğilme gerilme testi. 74
5.2. KEA10 kompozit malzemesinin eğilme gerilme testi. 76
5.3. KE20 kompozit malzemesinin eğilme gerilme testi. 78
5.4. KE33,3 kompozit malzemesinin eğilme gerilme testi. 80
5.5. KE33,3 kompozit malzemesinin eğilme test sonrasında görüntüsü. 81
5.6. Farklı lif içeriklerine sahip kompozit malzemelerin eğilme gerilmelerinin karşılaştırması. 81
5.7. Farklı lif içeriklerine sahip kompozit malzemelerinin basınç dayanımları. 83
5.8. KE33,3 kompozit malzemesinin basınç dayanım test öncesi ve sonrası. 84
5.9. Alev dayanım testlerinin sonucunda kompozit malzemelerde oluşan tahribat ve alev direnci..86
5.10. APP katkısız kenevir lif takviyeli epoksi kompozit (a) Yanma hızı test süreci-1 (b) Yanma hızı test süreci-2 (c) Yanma hızı test süreci-3…….87
5.11. KE5 epoksi kompozit malzemesinin frekansa karşı ses yutum katsayısı. 88
5.12. KEA10 epoksi malzemesinin frekansa karşı ses yutum katsayısı. 89
5.13. KE10 epoksi malzemesinin frekansa karşı ses yutum katsayısı. 89
5.14. KE20 epoksi kompozit malzemesinin frekansa karşı ses yutum katsayısı. 90

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

5.15. Ağırlıkça farklı yüzdelerde kenevir lif takviyeli kompozit malzemelerinin ses yutum katsayıları. 91
5.16. KE5, KE10 ve KE20 kompozit malzemelerinin yüzde su emme değerleri. (t=3dk, P=17 kPa vakum basıncı)……..... 92
5.17. Isı iletkenlik katsayısının test edildiği termal iletkenlik test ciharı C-Therm 93
5.18. KE10 kompozit malzemesine ait zamana karşı ısı iletim katsayıları. 95
5.19. KE5 kompozitin ısı iletim katsayısı için tekrarlanabilirlik test sonuçları. 97
5.20. KE10 kompozitinin her bir ölçümü için ısı iletim katsayısı. 97
5.21. KEA10 kompozitinin her bir ölçümü için ısı iletim katsayısı. 98
5.22. KE20 kompozitinin her bir ölçümü için ısı iletim katsayısı. 98
5.23. KE33,3 kompozitinin her bir ölçümü için ısı iletim katsayısı. 99
5.24. Sentezlenen farklı lif içerikli kompozit malzemelerin ısı iletim katsayıları. 100

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

3.1. Binaların yangından korunması hakkında yönetmelik tanımları ve bölümler. 13
3.2. Bina yalıtım malzemelerinin özellikleri (Kumar vd., 2020). 18
3.3. Farklı lif malzemelerinin bazı özellikleri ve karşılaştırmaları (Kumar vd., 2020). 27
3.4. Kenevir lifi ve diğer liflerin kimyasal bileşimleri (Manaia vd., 2019)....29
3.5. Oda sıcaklığında (RT) veya kaynatıldığında (B) NaOH ile muamele edilmiş kenevir lifinin kimyasal bileşimi ve ağırlık kayıpları. 36
3.6. Doğal lif / polimer kompozitler için kullanılan silanlar; kimyasal yapıları; organo işlevsellikleri ve hedef polimer matrisler (Xie vd., 2010). 41
3.7. Termoset ve termoplastik polimer kompozitlerinin bazı özelliklerinin karşılaştırması (Ngo, 2020). 43
4.1. Ağırlıkça farklı lif içeriklerine sahip kompozit malzemelerin yoğunluk tayini için ölçüleri. 70
4.2. Biyokompozit malzemelere yapılan yüzey geliştirme işlemleri. 70
5.1. KE5 kompozit malzemesinin fiziksel özellikleri, eğilme gerilmesi ve basınç dayanım sonuçları. 72
5.2. KE10 kompozit malzemesinin eğilme gerilme analiz sonuçları. 73
5.3. KEA10 kompozit malzemesinin eğilme gerilme analiz sonuçları. 75
5.4. KE20 kompozit malzemesinin eğilme gerilme analiz sonuçları. 77
5.5. KE33,3 kompozit malzemesinin eğilme gerilme analiz sonuçları. 79
5.6. Kenevir lif takviyeli kompozitlerin eğilme özelliklerinin karşılaştırılması. 82
5.7. Kenevir lif takviyeli kompozitlerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılması. 83
5.8. Kenevir lif takviyeli kompozitlerin basınç özelliklerinin karşılaştırılması. 85
5.9. Farklı lif içeriklerine sahip kompozit malzemelerinin ses yutum katsayıları. 88
5.10. Kenevir lif takviyeli kompozitlerin ses yutum katsayılarının karşılaştırılması. 91
5.11. Kenevir lif takviyeli kompozitlerin su emme yüzdelerinin karşılaştırılması. 93
5.12. KE10 kompozit malzemesinin ısı iletim katsayısı analiz verileri **(a)** 1.numune **(b)** 2.numune 94
5.13. KE5, KE10, KEA10, KE20, KE33,3 kompozitlerinin ısı iletim katsayısı analiz verileri. 96
5.14. Kenevir lif takviyeli kompozitlerin yoğunluk ve ısı iletim katsayı özelliklerinin karşılaştırılması. 101

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
W	Watt
m	Metre, Kütle
K	Kelvin
MPa	Megapaskal
mm	Milimetre
λ	Lamda
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
℃	Santigrat derece
ρ veya d	Yoğunluk
kg	Kilogram
cm	Santimetre
k	Termal iletkenlik
C_p	Özgül ısı kapasitesi
J	Joule
EC	Gömülü karbon
EE	Somut enerji
α	Ses yutum katsayısı
μ	Mikro
Φ	Yangına tepki
$	ABD Doları
R^+	Radikal
M^+	Elektron uyarımlı parçacıklar
e^-	Elektron
°	Derece
I_{abs}	Yutulan ses enerjisi, J
I_{inc}	Toplam gelen ses enerjisi, J
N	Newton
kN	Kilo Newton
ε	Birim şekil değiştirme, mm/mm
ΔL	Kuvvet ile boy değişimi, mm
L_0	Kuvvet uygulanmadan önceki ilk boy, mm

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler	**Açıklama**
σ	Eğilme gerilmesi, N/mm^2
L	Mesnetler arası uzaklık, mm
ω	Genişlik, mm
b	Numunenin yüksekliği, mm
pH	Asitlik bazlık derecesi
ml	Mililitre
V	Hacim
L / D	En boy oranı
Kısaltmalar	**Açıklama**
3PBT	Üç noktalı eğilme testi
A	En iyi yangın direnci
A-Cam	Alkali için
APS	Amino propil trietoksi silan
B	Kaynatılmış
CBC	Kannabikromen
CBD	Kannabinoid
CBDA	Kannabidolik asit
CBDV	Kannabidvarin
CBG	Kannabigerol
CBGA	Kannabigerolik asit
CBN	Kannabinol
C-Cam	Kimyasal için
CEM I	Portland çimento
CEN	Avrupa standartlar komitesi
CMC	Seramik matris kompozitler
DCS	Dikloro Dietil silan
E-Cam	Elektrik için
EDTA	Etilendiamin tetraasetik asit
EN	Avrupa normları
EPS	Genleştirilmiş polistiren
F	En kötü yangın direnci

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Kısaltmalar	Açıklama
FAO	Birleşmiş milletler tarım ve gıda örgütü
FR	Alev geciktirici
FTIR	Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
GHG	Sera gazı
GPS	Glisidoksipropil trimetoksi silan
HDS	Heksadesil trimetoksi silan
ISO	Uluslararası standardizasyon örgütü
M	Matris
MMC	Metal matris kompozitler
MPRS	Merkaptopropil trimetoksi silan
MPS	Metakriloksipropil trimetoksi silan
NF	Doğal elyaf
PF	Fenol formaldehit
PLA	Polilaktik asit
PMC	Polimer matris kompozitler
PUR	Poliüretan
PVA	Polivinil alkol
RT	Oda sıcaklığı
S, S2, S3	İkincil hücre duvarları
S-Cam	Yüksek mukavemet için
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TGA	Termogravimetrik analiz
THC	Tetrahidrokannabinol
THCV	Tetrahidrokannabivarin
TS	Türk standartı
UF	Üre-Formaldehit
UV	Ultraviyole
VSPP	Vinil trimetoksi silan
VTS	Vinil trimetoksi silan
XPS	Ekstrüde polistiren

1. GİRİŞ VE AMAÇ

İnşaat sektörü, toplam nihai enerjinin yaklaşık üçte birini tüketir ve dünya çapında enerjiyle ilgili sera gazı (GHG) emisyonunun üçte birinden sorumludur. Nüfus artışı, teknoloji ve kentleşmedeki ilerlemeyle birlikte insan yaşam tarzındaki değişim nedeniyle tüketimin önümüzdeki on yılda %53'e ulaşması bekleniyor; bu beklenti bu sektörden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını daha da artırabilir ve olumsuz çevresel, sosyal ve ekonomik etkilere yol açabilir. Bu nedenle, bina enerji tüketiminin ve buna karşılık gelen CO_2 emisyonunun azaltılması sürdürülebilirlik için çok önemlidir (Kumar vd., 2020).

İnsanoğlunun çevreye duyarlı ve çevre dostu ürünler tüketme arzusu ile ağırlıklı olarak otomotiv ve inşaat sektörlerine yönelik doğal elyaf (NF) takviyeli kompozit üretiminde hızlı artış gözlenmiştir. Kenevir, jüt, sisal, hindistan cevizi vb. gibi NF türlerinin takviyesi; cam elyaf ve karbon elyaf yerine pek çok avantaj getiriyor. NF biyolojik olarak parçalanabilir ve doğası gereği yenilenebilirdir, daha düşük yoğunluğa sahiptir, yanma sırasında daha düşük miktarda zararlı gaz ve katı kalıntı üretir ve işleme sırasında kalıplarda ve makinelerde daha az aşınmanın olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, araştırma ilgi alanları iyileştirilmiş özelliklere sahip yeni çevre dostu malzemelerin geliştirilmesine doğru yön verilmiştir (Dayo vd., 2018a).

Doğal lif, karbon ve cam gibi endüstriyel liflerle işlenen geleneksel polimer kompozitleri geliştirmek için hem termoplastik hem de termoset matrislerle güçlendirilmektedir. Yaşam döngüsü değerlendirmesinde yapay olarak cam elyaflara kıyasla NF kompozitleri olağanüstü çevresel performans göstermiştir. Sisal, kenaf, jüt, keten ve kenevir içeren NF, farklı reçinelerle başarıyla takviye edilmiştir. Düşük yoğunluklu, yenilenebilirlik, bol miktarda bulunur olması, düşük işlem enerjisi gereksinimleri, cilt tahrişi yapmaması, yüksek mukavemet ve elastikiyet modülü, ağırlık oranına göre daha yüksek mukavemet ve yüksek en boy oranı (L / D) sentetik elyafa göre maliyet etkinliği olarak çekici özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. NF kompozit prosesinde en büyük sorun, doğal liflerin hidrofilik, reçinelerin ise hidrofobik doğası nedeniyle fiber-reçine uyumluluğudur. Uyumluluk problemi, kimyasal bağlanma, fiziksel yapışma ve mekanik kilitleme ile çoğaltılabilen zayıf fiber-reçine arayüzünü üretir (Dayo vd., 2017).

Doğal lifleri işlemenin fiziksel yöntemleri, esas olarak doğal lif demetlerini tek tek filamentlere ayırmak ve kompozitler üzerindeki uygulamasını geliştirmek için liflerin yüzey yapısını değiştirmek amacıyla kullanılır. Doğal liflerin işlevselleştirilmesi için bazı fiziksel yöntem olarak; plazma, ultrason ve UV ışınımı örnekleri verilebilir.

Fiziksel yöntemlere alternatif olarak, doğal lifler ayrıca alkali muamelesi (merserizasyon), silan muamelesi, maleatlı birleştirme, asetilasyon, permanganat ve peroksit muamelesi, benzoilasyon, aşı polimerizasyonu, eterifikasyon, izosiyanat muamelesi gibi çeşitli kimyasal yöntemlerle muamele edilebilir. Doğal liflerin modifikasyonuna yönelik bu kimyasal işlemler, yüzey ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. Bu kimyasal modifikasyonlar, doğal liflerin (örneğin hidroksil grupları) reaktif bileşenleri arasındaki kimyasal reaksiyonlardan ve ikisi arasında kovalent bir bağ oluşturan kimyasal bir reaktiften oluşur. Bu kimyasal işlemler ile (örneğin alkali işlemin), hemiselüloz ve lignin gibi zayıf bileşenleri lif yapısından çıkarmasının yanı sıra kristal yapılarını değiştirerek doğal liflerin mekanik özelliklerinin önemli ölçüde iyileştirebildiği gözlenmiştir. Aynı zamanda, doğal liflerin nem emilimi ve müteakip şişmesi de seçici kimyasal işlemlerle (örneğin su itici maddeler) azaltılabilir. Ayrıca, silan birleştirme ajanı muamelesi, güçlü kimyasal bağ oluşumu yoluyla fiber / matris arayüz etkileşimlerini de iyileştirebilir ve bu nedenle kompozitlerin mekanik performansında önemli bir gelişme ile sonuçlanabilir (Ferreira, 2019).

Polimer matrisli karma malzemelerin üretim yöntemleri; el yatırma, püskürtme, basınçlı (presli) kalıplama, transfer kalıplama, soğuk kalıplama, vakumlu kalıplama, otoklavda kalıplama, flament sarma, pultrüzyon, matris enjeksiyon, enjeksiyon ve santrifüj yöntemleri olarak verilebilir.

Bu çalışmanın amacı sentezlenen epoksi bazlı kenevir lif ile güçlendirilmiş biyokompozit malzeme sentezlemektir. Bu tür malzemeler ekolojik, ucuz, kolay üretim, daha yüksek mukavemet, düşük yoğunluk gibi birçok avantaj sunmaktadır.

Sayılan avantajlar göz önünde bulundurularak hammadde olarak doğal lif malzemesi olan kenevir lifi seçilmiştir. Kütlece farklı yüzdelerdeki lif ile güçlendirilmiş epoksi bazlı biyokompozit malzemeye eğilme-basınç dayanımları, ısı iletim katsayısı, ses yutum katsayısı, yanma hız testi ve vakum altında su emme davranışları incelenmiştir.

2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

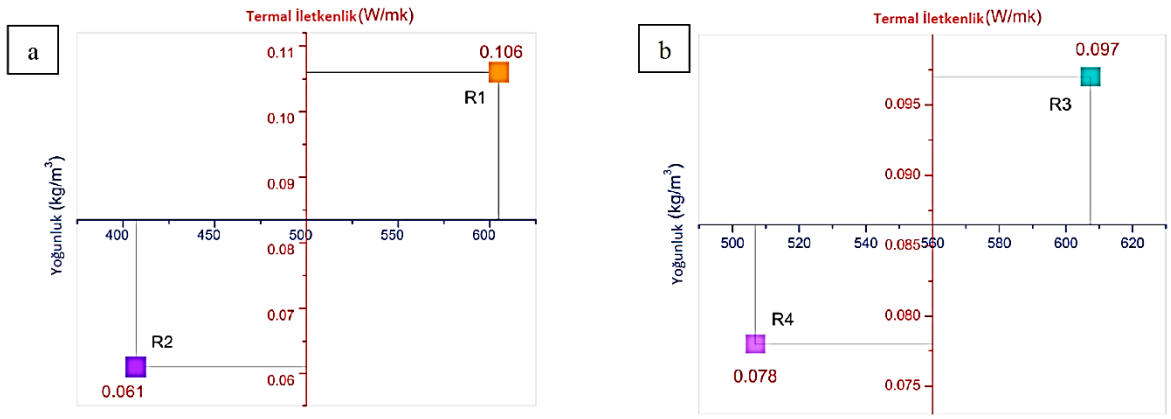
Doğal lif takviyeli kompozit malzemeleri, bina yalıtım uygulamalarında başta olmak üzere çeşitli alanlarda yeni kullanım alternatifleri sunmakta, bu konu ile ilgili araştırmalar ve çalışmalar hız kazanmaktadır. İncelenen literatür kaynakları son 12 yıla ait olmakla beraber daha çok güncel makale araştırmalarının kısa açıklamaları konuya uygun olarak aşağıdaki sıraya göre ele alınmıştır; polibenzoksazin kompozitler (termal kararlılık), poliüretan kompozitler (ısı iletim katsayısı), çimento ile üretilmiş kompozitler (ısı yalıtım ve mekanik davranış), epoksi hibrit kompozitler (akustik özellik), kenevir elyaf takviyeli kompozitler (ses yalıtım), epoksi matris ve kenevir elyaf takviyeli kompozitler (akustik özellikler), kenevir elyaf takviyeli kompozitler (alev geciktirici özellik kazandırılmış). Konuya uygun olarak aşağıdaki sırayla ele alınmıştır.

Dayo vd (2018) enerji krizleri, çevresel sorunların getirdiği farkındalık ile beraber biyo bazlı kenevir lif takviyeli polibenzoksazin kompozitleri için kenevir lifi üzerinde uyguladıkları kimyasal işlemlerin mekanik, termal ve su emme özelliklerini incelemişlerdir. Uygulanan kimyasal işlemler sonucunda silanla muamele edilmiş liflerin daha yüksek termal stabilite ve daha düşük su emme özellikleri gösterdiği tespit edilmiştir. Lif yapısında bulunan yağlar, balmumu, lignin, hemiselüloz gibi mekanik ve termal açıdan olumsuz özellikler gösteren maddelerin giderimi kimyasal işlemlerle yapılmıştır. Kimyasal etkilerin incelenebilmesi için işlem görmemiş liflerin yanında işlem görmüş liflere Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Termogravimetrik Analiz (TGA) yöntemleri ile karakterize etmişlerdir. Karakterizasyonun sonucunda kimyasal işlemlerin etkinliklerinin olumlu katkılar sağladıklarını göstermişlerdir.

Geleneksel poliüretan malzemelere alternatif olarak kenevir lif takviyeli kompozit malzemenin mekanik davranışları, su emme ve ısı iletkenlik testleri Sair vd. (2018) tarafından gerçekleştirilmiştir. Hidrofilik özellik gösteren kenevir lifleri oldukça fazla su tutma eğilimindedirler. Lif miktarındaki artışla beraber kompozit malzemenin su emiliminin de arttığı gözlenmiştir. Poliüretan malzeme kenevir lifinden daha yüksek ısıl iletkenlik değerine sahiptir. Lif içeriği arttıkça poliüretan matrisli bu malzemenin ısı iletim katsayısında artış gözlenmiştir. Poliüretan malzemenin ısı iletkenlik değeri 0,0306 iken %30

kenevir lif takviyeli kompozit malzemenin ısı iletkenlik değeri 0,0480 W/ mK olarak ölçülmüştür. Gerilme mukavemeti ve Young modülüne göre %15 lif takviyeli kompozit malzemede en iyi sonuç alınmıştır. Eğilme dayanımında ise %15 lif içeriğine kadar bir artış gösterdiğini, %20 lif içeriğinden sonra ise düşüş gösterdiği belirlenmiştir.

Fernea vd (2019) bu çalışmada sürdürülebilir, ekonomik ve CO_2 emüsyonlarını düşürecek çevre bilinci kapsamında kenevir lif takviyeli ısı ve ses yalıtımı ve mekanik özellikleri incelemek üzere bağlayıcı malzeme olarak estetik bir görünüş de kazandırmak amacıyla CEM I 52,5R Portland Beyaz Çimento kullanmışlardır. Malzemeler tek katmanlı kenevir sapları (R1), tek katmanlı lifler (R2), çok katmanlı kenevir sapları (R3) ve çok katmanlı lifler (R4) olarak hazırlanmıştır. Kenevir liflerini bağlayıcı malzeme olan beyaz çimentoya eklenen su ile belirli oranda kıvamlaştırarak malzeme sentezi gerçekleştirmişlerdir. Ses yutum katsayısı için empedans tüpü, ısı iletim katsayısının ölçümü için ise FOX 200 cihazı kullanılmıştır. Ses yutum katsayısı için kenevir lifi ve çimento ile hazırlanmış malzeme en yüksek performansı sunmuş, 1500Hz frekansta %90 etkinlik göstermiştir. Tek tabakalı kenevir lifleriyle hazırlanmış kompozit malzemenin ısı iletim katsayısı en verimli sonucu (0,061 W/mK) sunmuştur. En hafif malzemenin (sadece kenevir lifinden oluşan tek katmanlı olarak sentezlenen kompozit malzeme) ısı iletim katsayısı 0,061 W/mK olarak ölçülürken en ağır malzemenin (sadece kenevir şivlerinden oluşan tek katmanlı kompozit malzeme) ısı iletim katsayısı 0,1 W/mK olarak ölçülmüştür. Şekil 2.1' de malzemelerin yoğunluk ve ısı iletkenlik katsayıları verilmiştir. Bu sebepten yoğunluk değeri yüksek olan malzemelerin ısı iletim katsayısı yüksek olduğunu, sonuç olarak da ısıl iletkenlik değeri artarsa, numunenin ısıl performansları daha düştüğünü yorumlamışlardır.



Şekil 2.1. Malzemelerin ısıl performansları (a) R1 ve R2 tek katmanlı
(b) R3 ve R4 çok katmanlı kompozit malzemelerdir.

Çomak vd (2018) çalışmalarında kenevir lifini sadece mekanik özelliklerinin katkılarından değil aynı zamanda yenilenebilir, kolay erişilebilir ve ucuz olması sebebiyle tercih etmişlerdir. CEM I 42,5R sınıfında yer alan Portland çimentosu bağlayıcı olarak seçilmiş, hazırlanacak harcı plastikleştirmek adına süper akışkanlaştırıcı, dolgu malzemesi olarak 40-45 AFS (incelik indeksi) silis kumu kullanılmıştır. Kenevir lifleri 6mm, 12mm ve 18mm uzunluklarda kullanılmış ve uzunluklarının etkisi de incelenmiştir. Kompozisyonun sentezinde TS EN 196-1 standardı kullanılmıştır. Taze harç kullanımındaki deneylerinde lif uzunluklarının harç akışına olumsuz bir etkisi olmamış fakat kalıba yerleştirmenin daha zor gözlemlemişlerdir. % lif miktarının artmasıyla ise taze harcın akışı olumsuz etkilenmiştir. Sertleşmiş kompozit numunelerin yoğunluklarında lif miktarıyla birlikte önemli bir değişim gözlenmemiştir. Numunelerin kodlamasında malzeme (M), uzunluk (6,12 ve 18), lif miktarı ise (1,2 ve 3) şeklinde olmuştur. Referans numune ile bir karşılaştırma yapılarak; maksimum su emme oranı %19, M-18-1 numunelerinde; minimum su emme oranı %2'den az olan, M-12-1 numunelerinde gözlemişlerdir. Bu numunelerden su emme yüzdesi M-18-1 için %6,94 iken M-12-1 için %5,69 olarak bulmuşlardır. Bağlayıcı olarak çimentonun tam kürlenme süresi 28gündür. Çimento bağlayıcı ile hazırlanan kompozitin mekanik testleri için 7 ve 28.günlerde testler yapılmalıdır. Bu çalışmada 28.gün sonrasında 6mm uzunluklu ve elyaf oranı %2 olan kompozit malzemenin en yüksek basınç dayanımına (39,48MPa) sahip olduğu bulunmuştur. En düşük basınç dayanımına (19,4MPa) ise 6mm uzunluklu ve elyaf oranı %3 olan kompozit malzeme olduğu görülmüştür. Eğilme mukavemetleri testlerindende harca eklenen lif miktarının %1 ile %17 arasında artırılarak çalışılmıştır. Uzun liflerin basınç dayanımında etkili olduğu düşünülürken eğilme dayanımında bir etkisi olmamış ve yakın sonuçlar elde edilmiştir. Eğilme çekme teslerinden sonra gerçekleştirilen basınç dayanım testlerindeki düşük değerlerin sebebinin önce yapılmış olan eğilme çekme testlerinden kaynaklı mikro çatlaklardan olduğunu düşünmüşlerdir. Yapılan SEM analizlerinde ise kenevir lifinin geometrik yapısı nedeniyle çimentoya çok iyi tutunduğu tespit edilmiştir. Çalışmaların sonucunda %2-3 elyaf oranı ve 12mm uzunluklu kenevir elyaflarının optimum koşulları sağladığı sonucuna varılmıştır.

Buksnowitz vd. (2010) tarafından rejenere selüloz lifleri, kenevir lifleri ve keten lifleri takviye malzemesi olarak, epoksi reçine ise matris olarak kullanılmıştır. Kompozit malzeme içerisinde liflerin düzenli dağılımı için çelik kalıp kullanılmıştır. Bu çelik kalıba kalıp ayırıcı wax uygulanmış ve üzerine sıvı polivinil alkol (PVA) uygulanmıştır. Epoksi

reçine lifler üzerine emdirildi ve oluşan hava kabarcıkları metalik bir silindir ile alındı. Kompozitler basınç ve sıcaklıkla preslenerek hazırlandı. Bu çalışmada yüksek sönümlemle kapasiteleri olan doğal elyaf takviyeli bu kompozitler etkili bir şekilde uygulama alanlarında yer bulabileceği gözlenmiştir. Keten lifi nispeten düşük ultrason hızına sahipken kenevir lifi referans olarak seçilmiş cam lif takviyeli kompozitinin seviyesini aşmıştır. Ekolojik etkisi, bulunabilirlik ve ucuz olması gibi diğer avantajları sebebiyle bu malzemeler yüksek titreşim sönümleme araçlarında profesyonel amaçlı olarak kullanılabileceğini yorumlamışlardır.

Isı yalıtım malzemesi olarak kullanılabilen doğal elyaf olan kenevir Santoni vd. (2019) tarafından akustik özellikleri üzerine yapılan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Geleneksel elyafların yerine doğal, ekolojik, sürdürülebilir ve yenilenebilir bir kaynak olan kenvir elyafını bu çalışmada tercih etmişlerdir. Ses yutum katsayısı için empedans tüpü kullanılmış, hava akış direnç ölçümleri için ise geliştirilmiş yeni bir modelleme olan Tarnow modellemesi kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir. Kenevir elyaf üzerinde CAR denilen taraklama işlemi uygulanmış ardından NaOH ile alkalizasyon yapılmış ve tekrar geniş ve ince taraklarla tarama işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Bu taraklama işleminin yapılmadığı durumlarda akustik özelliklerde ve hava akımı direnci gibi fiziksel özellikler üzerinde etki gözlenmemiştir. Taraklama işlemi uygulandığında ise hava akış direncinde ve liflerin etkin olan yarıçaplarında azalmaya yol açarak akustik performansında olumlu etki göstermiştir.

Enerji kaynaklarının kullanımı, çevre bilinci, atık yönetimi gibi konularda olumsuz etkilerin azaltılması hususunda bütün dünya ülkelerinin aldıkları kararlar ile biyo temelli üretim malzemelerinin kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu çalışmada Dragonetti vd. (2020) kenevir lif takviyeli epoksi sandviç kompozit malzeme hazırlamışlardır. Kenevir liflerine alkalizasyon ve nötralizasyon işlemleri uygulanmıştır. Ses iletim kaybı testleri için numuneler 100mm çapında kesilmiştir. Ses yutum katsayısının ölçümü için empedans tüpü kullanılmıştır. Ses yutum katsayısının ölçümü için bir başka yöntem olan yankı odalarıdır fakat bu çalışmada yankı odaları için daha büyük parçalar ve daha fazla malzeme ihtiyacından ötürü bu yöntem daha uzun bir süre ve daha fazla maliyet gerektireceğinden ötürü empedans tüpü ile bu test gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak, pratik kullanımlarda tercih edilebilir bir malzemeyi sentezlemişlerdir. Daha sonraki çalışmalarda farklı fiber dizilimleri, reçine miktarlarının ve farklı reçine türleri ve katman sayılarını kullanarak daha farklı malzeme sentezi gerçekleştirilebileceğini önermektedirler.

Bocz vd. (2015) yalıtım malzemesinin alev geciktirici özelliklerini incelemek üzere fosforik asit kullanmışlardır. Fosforik asit kullanarak 3 farklı yöntem ile uygulamışlardır. Bu yöntemleri kullanarak yapılan uygulamalar kenevir liflerinin fosforik asit çözeltisi ile muamelesi ve ardından nötürleştirme, kenevir liflerinin epoksi ile olan bağlanma özelliklerinin geliştirmesi amacıyla 3-aminosilan ajanının kullanımı ve son olarak birinci yöntem ile sol-gel yöntemiyle kaplamayı birleştiren uygulama aşamalarını içermektedir. Fosforik asitin alev geciktirici özelliğini sadece liflere değil aynı zamanda epoksi reçineye de katkı sağladığını göstermişlerdir. Bu çalışmada sonuç olarak epoksi ile birlikte amin tipinde fosfor içeren bir kürleme ajanı seçilmiş ve sonucunda epoksi matrise gömülü liflerin ve matrisin alev dayanımını arttığını belirtmişlerdir. Elde edilen malzeme alev geciktirici özellikleri incelenirken UL-94 V0 standardına uyduğu görülmüştür ve bu UL-94 V0 standardı birkaç test ile gerçekleştirilmiştir. Bunlar ise; (1) her uygulanan alevden sonra numunenin kendini söndürme süresi, (2) numunenin tamamen yanıp yanmaması, (3) aynı numuneye ardışık 10 adet alev uygulamasından sonra numunenin toplamda kendini söndürme süresi ve son olarak (4) 2. alev uygulamasından sonra numunenin akkorlaşma süresidir. Alev geciktirici (Flame delayer/ FR) katkısının kompozit malzemenin mekanik dayanımlarında düşüşlere sebep olduğu fakat alev geciktirici özelliklerinin hem matriste bulunan amin bazlı fosfor içerikli kürleme ajanını hem de kenevir kumaşa uygulanmış alev geciktirici özelliklerini iyi yönde etkilediğini bulmuşlardır.

3. TEORİK BİLGİ

3.1. Yalıtım ve Yalıtım Türleri

Yalıtım, insanların doğa koşullarından kendilerini koruma amacıyla ilk çağlardan bu zamana kadar geliştirdikleri çeşitli mekân ve malzemelerdir. Isı yalıtımı, ses yalıtımı, yangına karşı yalıtım ve su yalıtımı insanların geliştirdikleri ve geliştirmekte oldukları malzemelerdir. Geleneksel mimari örnekleri ele alındığında çevresel koşullara uygun doğal yalıtım sistemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Yalıtım malzemeleri ile enerji tüketiminde tasarruf sağlamak amaçlanmış, sera gazı etkileri mümkün olan en düşük seviyelere çekilmiş, doğal yalıtım malzemeleriyle beraber ekolojik, sürdürülebilir teknolojik ürünlerle doğal koşullar kontrol altına alınmıştır (Koçlar Oral ve Manioğlu, 2010).

3.1.1. Isı yalıtımı

Genel olarak iki farklı ortam arasındaki sıcaklık farklarını istenilen düzeyde sınırlandırma işlemleri için bir yapının çatısında, pencerelerinde, zeminlerinde, tavanlarında vb. alanlara uygulanabilir bir malzeme ile sağlanır. Gerçekleştirilen bu uygulama ile özellikle enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Isı yalıtım uygulanarak yakıt tüketimi ve soğutma ihtiyaçlarına yönelik enerji tüketiminde kazanç sağlanır. Isı yalıtımı sadece vakit geçirdiğimiz odalarda konfor sağlamak için değil aynı zamanda akışkanların geçtiği borularda akışkanın donmasına engel olmak amacıyla da kullanılır. Kullanılan yalıtım malzemesi ile sera gazlarının bir miktar önüne geçmek, konfor alanı oluşturmak, yoğuşma sonrasında oluşan deformasyonların da önüne geçmek amacıyla ısı yalıtım malzemeleri büyük önem arz eder (İZODER, 2013a).

Enerji kaynaklarından olan ısı doğa kanunlarınca her zaman sıcak ortamdan soğuk ortama doğru bir akış izler. Bu akış durdurulamaz fakat ısı yalıtım malzemeleri sayesinde kontrol altına alınabilir (Özgür vd., 2015).

Isı yalıtım malzemelerinin ısı yalıtım malzemesi olarak kabul edilebilmesi için ISO ve CEN standartlarına göre ısı iletim katsayısı (λ) 0,065 W/mK değerinden küçük olmalıdır. Isı iletkenlik katsayısı ne kadar düşük olursa ısı geçişine karşı direnci o kadar fazla olacaktır (Özgür vd., 2015).

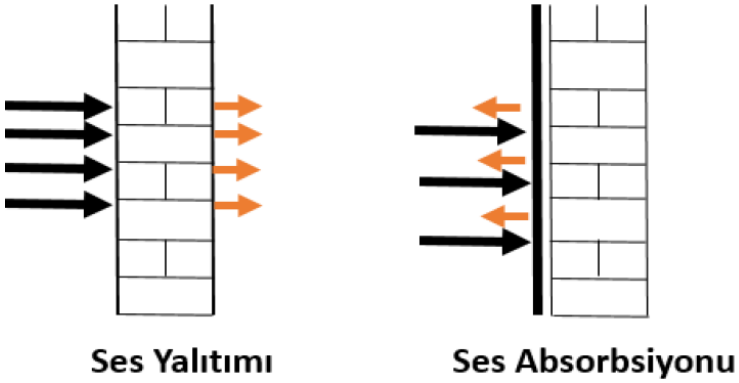
Isı yalıtım malzemesi binalarda uygulama ile binaya yük getirir. Bunun neticesinde deprem gibi bir afet durumunda olumsuzluk getirecektir. Bunun önüne geçebilmek için ısı yalıtım malzemeleri hafif olmalıdır. Isı yalıtım malzemelerinde aranan diğer özelliklere değinelim. Şekil değiştirme, kılcal ya da büyük çatlaklar, bakteri üretimi, çekmeye ve basınca dayanıklılık, su geçirimsizlik ve neme karşı dirençli olması, yangın güvenlik önlemleri sebebiyle yanma dayanımı, yanma esnasında ortaya çıkan zehirli gazlar gibi bir çok etken gözetilmelidir (BEKTAŞ vd., 2017).

3.1.2. Ses yalıtımı

Ses, işitme organının bir tepkisi olarak kulak tarafından algılanan katı, sıvı, hava veya elastik bir ortamda oluşan belirli bir dalga boyuna sahip, ortamdaki basınç farkı olarak tanımlanır. İnsan kulağının minimum duyacağı frekans 20 Hertz (Hz) iken maksimum değer 20 kilohertzdir (kHz). Bu belirlenmiş aralıklarda olmayan seslerin insan işitme duyusu tarafından işitilemez.

Seslerden korunmanın iki yolu vardır. Bunlardan birisi ses yutum yani ses absorpsiyonu, diğeri ise ses yalıtımıdır. Bu iki yöntem birbirinden farklıdır. Ses yutum sağlayan bir malzeme (Şekil 3.1), üzerine gelen hava parçacıklarını absorbe ederek bir kısmını ısı enerjisine dönüştürür. Böylece sesin enerjisi azalmış olur. Ses absorpsiyonu ya da ses yutumu deyimleri kullanılan kaynağın ne kadar ses yuttuğunu gösterir.

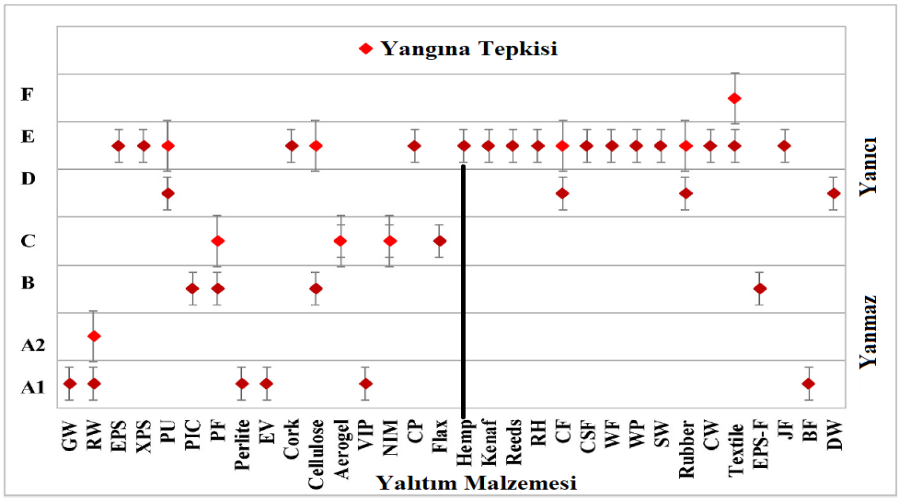
Ses yalıtımı (Şekil 3.1) ise; ses dalgaları ulaştıkları malzeme üzerinde farklı elastikiyet ve yoğunluklarla karşılaştığında enerjisinin bir kısmını ısı enerjine dönüştürür, bir kısmını yansıtır ve kalan kısmını iletir. Bina yapılarının dış kısmında uygulanan ses yalıtım malzemeleri az veya çok ses yalıtım sağlamaktadır (Kaya ve Dalgar, 2017).



Şekil 3.1. Ses yalıtımı ve ses absorpsiyonu.

3.1.3. Alev geciktiriciler

Bina yapılarında yangın tehlikeleri bütün dünyada sorun oluşturmaktadır. Binalarda oluşan yangınların hızla büyüyeceği yapı malzemelerinin kullanımından kaçınılmalıdır. 1993-2015 yılları arsında bütün dünyada toplamda 84,6 milyon yangın vakası belgelenmiş ve 1 milyon insan hayatını kaybetmiştir. Yangın vakaları yıllık olarak gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde 44.300 ölümden sorumludur. Çevresel, sosyal sorumluluklar kapsamında yangın dayanımlı malzemelerin kullanımı önem kazanmıştır. Isı ve ses yalıtım özellikleriyle kullanılan sentetik ve doğal lifler ile üretilmekte ve gelişmekte olan malzemelerin yangına dirençleri Şekil 3.2 de en iyisi A, en kötüsü F olarak sınıflandırılmıştır (Kumar vd., 2020).



Şekil 3.2. Yapı yalıtım malzemelerinin yangına tepki sınıflandırması.

Doğal lifler yapıları gereği yanıcı malzemelerdir. Bu yüzden bina yapılarında kullanılması alevlenme direnci bakımından olumsuz özellikler teşkil etmektedir. Bu olumsuzlukların önüne geçebilmek adına doğal lifler üzerine kimyasal modifikasyonlarla geliştirme yapılabilir. Halojenlenmiş, brom katkılı, klor katkılı, fosfor katkılı gibi alev geciktiriciler ile liflerin muamelesi liflerin termal direncini artırarak alev dayanımlarını desteklemektedir. Lifler ile bir kompozit malzeme sentezi gerçekleştirilecek ise polimer ürünü ile birleştirilen kürleme ajanının seçimi de yangın geciktirici özelliği için avantaj sağlar (Shah vd., 2017).

Yapı malzemelerinin yangına karşı verdikleri tepkilerle ilgili olarak, ülkelerin halihazırda sahip oldukları yerel standartlar da gözetilerek, bütün Avrupa Birliği ülkelerinde kabul gören sınıflandırma esasları ve test prosedürleri tanımlanmış ve oluşturulmuştur. Bu düzenlemelere göre yapı malzemelerinin yangın davranışları; tutuşma, alev yayılımı ve duman gazı üretimi gibi parametrelere bağlı olarak sınıflandırmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonrasında Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmeliğin, TS EN 13501-1 standardında verilmiş yanıcılık sınıfları dikkate alınarak yenilenmiştir. Türk Standartları Enstitüsü bu standardı 16.12.2019 tarihinde kabul etmiş ve bugün (11.01.2022) hala yürürlüktedir. Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelikte yapılan ilgili tanımlar ve bölümler Çizelge 3.1'de verilmiştir (Kaya ve Oğuz, 2015).

Çizelge 3.1. Binaların yangından korunması hakkında yönetmelik tanımları ve bölümler.

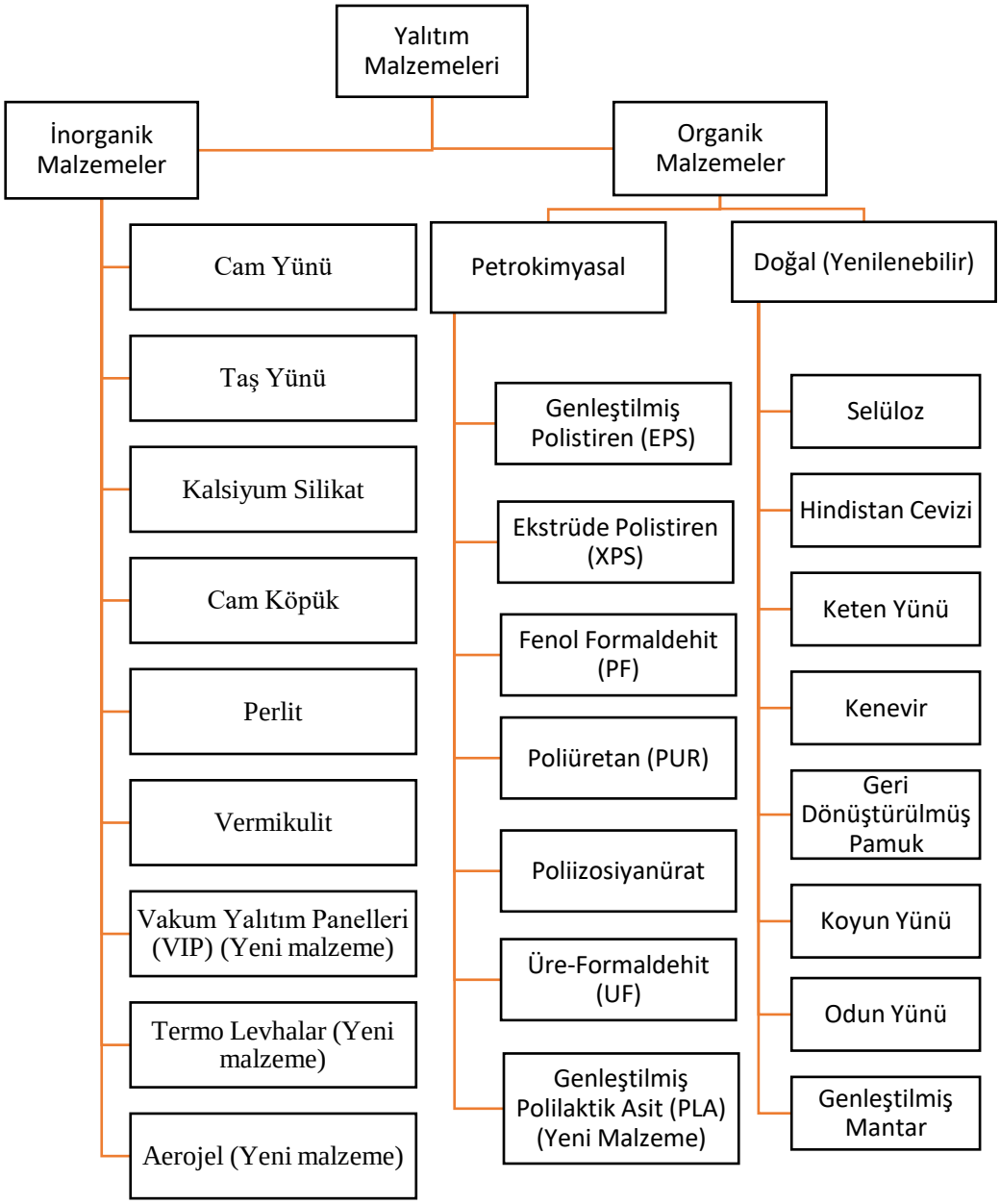
Yapı tipi belirleme	Ek talepler		Avrupa sınıfı TS EN 13501-1	DIN 4102'ye göre yapı malzemesi sınıfı
	duman yok	Yanma damlama/ düşme yok		
Yanmaz	✓	✓	A1	A1
	✓	✓	A2-s1,d0	A2
Yangına karşı dayanıklı	✓	✓	B-s1,d0	B1
	✓	✓	C-s1,d0	
		✓	A2-s2,d0	B1
		✓	A2-s3,d0	
		✓	B, C-s2,d0	
		✓	B, C-s3,d0	
	✓		A2-s1,d1	B1
	✓		A2-s1,d2	
	✓		B, C-s1,d1	
	✓		B, C-s1,d2	
			A2-s3,d2	B1
			B-s3,d2	
			A2-s3,d2	
normal alev-lenebilirlik	✓	✓	D-s1,d0	B2
		✓	D-s2,d0	
		✓	D-s3,d0	
			E	
	✓		D-s1,d2	B2
			D-s2,d2	
			D-s3,d2	
			E-d2	B2
alevlenebilir			F	B3

3.1.4. Su yalıtımı

Yapılara zarar veren bir dış faktör; hava koşullarından kaynaklanan yağmur, kar, toprağın nemi ve bunlarında dışında bina temelinden kaynaklı olan suların etkileri yapılarımızda dayanımı düşürmekte, bakterilerin üremesine ortam hazırlamakta ve insan sağlığına zarar vermektedir. Dış faktörlerin etkisinden ayrı olarak yapılarımızın ıslak zemin olarak tanımlanan banyo, tuvalet ve mutfak tezgahlarının bulunduğu konumlar yine su yalıtımı için dikkat edilmesi gereken alanlardır. Sözü edilen bu dış kaynaklar ve iç kaynaklara karşı konfor ve yapımızı korumak amacıyla uygulanan bu malzemelere su yalıtım malzemeleri denir. Su yalıtımı ile amaç binaya ve donatılara ulaşmadan önce suyu, rutubeti engellemektir. Uygulanan su yalıtım malzemeleri ile suyun tahliyesi için hazırlanmış drenajlar yönlendirme elemanları kullanılarak su binadan uzaklaştırılır (İZODER, 2013b).

3.2. Yalıtım Malzemesi Türleri

Bina yapılarında kullanılan yalıtım malzemeleri kökenlerine, kimyasal içeriklerine ve bulunabilirliklerine göre Şekil 3.3' de gösterildiği gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 3.3. Yapı yalıtım malzemelerinin sınıflandırılması (Durakovic vd., 2020).

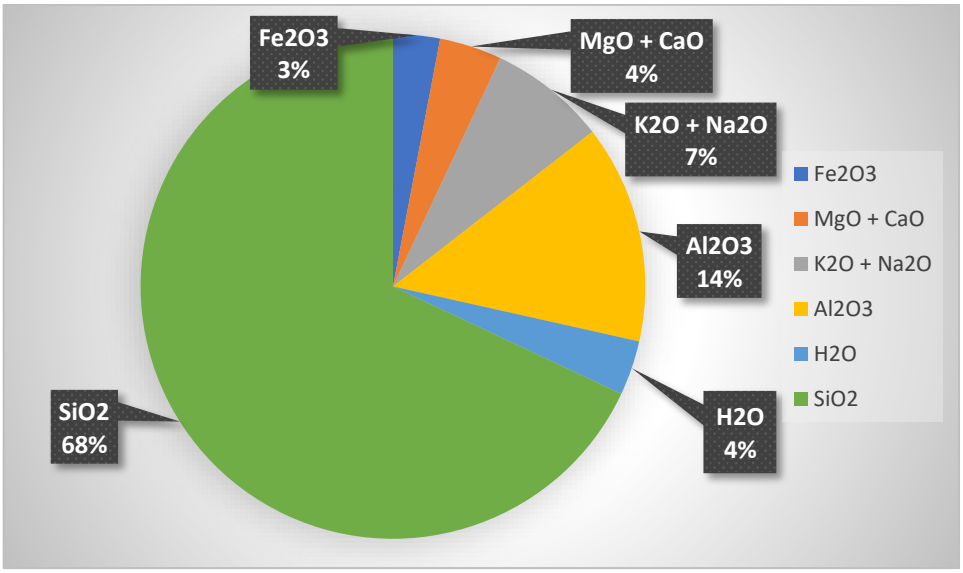
3.2.1. İnorganik yalıtım malzemeleri

Geleneksel yalıtım malzemeleri olarak adlandıracağımız aşağıdaki yalıtım malzemeleri halihazırda binalarda kullanılmaktadır (Kumar vd., 2020).

- **Cam yünü,** inorganik bir madde olan silis kumu yüksek basınç ile 1200 ile 1250°C de ergitilerek ve elekten geçirilerek elyaf haline getirilen gözenekli bir malzemedir (Özgür vd., 2015). Liflere dönüştürülürken santrifüjleme ve üfleme işlemleriyle gerçekleştirilir. Isı iletim katsayısı 0,040 W/mK değerindedir (Arslan ve Aktaş, 2018).

- **Taş Yünü,** dolomit, bazalt ve diyabaz gibi taşların 1400 ile 1600°C sıcaklıkta eritilerek elde edilen liflerdir. Liflerin birbirine bağlanmasını sağlamak amacıyla genellikle polyester reçine, gıda nişastaları ve yağlar gibi bağlayıcılarla istenilen ölçülerde ısı ve ses yalıtımı sağlayan yalıtım paneli ana ürünüdür. Taş yünü yanmaz bir malzeme olmasına karşın yanıcılığını azaltmak adına bazı katkı malzemeleri de eklenerek 250°C' ye kadar yangına karşı dayanım sağlayabilir. Isı iletim katsayısı ise 0,033-0,040 W/mK aralığındadır (Arslan ve Aktaş, 2018).

- **Perlit,** genleştirilmiş perlit sülfatlı organik tortul taş olan perlitin 900-1100°C' de şok ısı ile genleştirilmesiyle elde edilir (Arslan ve Aktaş, 2018). Perlit, üzerinde işlem görmemiş haliyle yapısında su parçacıklarının yer aldığı riyolit volkanik cam (doğal cam) dır. Kimyasal içeriğinde %2 ila %5 su bulunan hidratlı bir Sodyum Potasyum Alüminasilikattır. Perlitin kimyasal içeriği Şekil 3.4' de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.4. Perlit kayasının kimyasal bileşimi (Arslan ve Aktaş, 2018).

Perlitin erime sıcaklığı 950-1300°C arasındadır. Yığın yoğunluğu 30-180 kg/m^3' tür (Krzyzak vd., 2018). Isıl iletkenlik katsayısı 0,045-0,065 W/mK' dir. A sınıfında yer alan yanmaz bir malzemedir (Özgür vd., 2015).

Ses yutum katsayısı ise hafif genleştirilmiş kil agrega ve yine genleştirilmiş bir ısı yalıtım malzemesi de olan vermikulit gibi granüllü malzemelere benzer özelliktedir (Arslan ve Aktaş, 2018).

- **Vermikülit,** volkanik magmalardan elde edilen bir mineral türüdür (Gencel vd., 2014). Vermikülit, ham vermikülütin 600°C' de 10 saniye ısıtılmasıyla elde edilir. Bir başka kaynağa göre ise; 800-1100°C sıcaklıkla genleştirilerek elde edilen steril, çok hafif, kokusuz ve ısıtma ile beraber geçirgenliği artan bir ısı ve ses yalıtım malzemesidir. Genleştirilmiş perlit ısı iletim katsayısı 0,062-0,090 W/mK aralığındadır. Bağlayıcı bir malzeme ile birlikte hazırlanan bu yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısı 0,080-0,100 W/mK aralığında bir değişime uğrar (Arslan ve Aktaş, 2018).

- **Genleştirilmiş perlit,** çok düşük yoğunluğa, ısı yalıtım için düşük ısı iletim katsayısına sahip, ses absorpsiyonuna ve yangına karşı dirence sahiptir. Bu yüzden inşaat agregası olarak kullanılan dolgu malzeme kum yerine belirli oranda kullanılabilir bir malzemedir. Bina yapılarında kullanılan bu tür malzemelerde düşük yoğunluk arandığından bu malzemenin bina sıvalarında veya betonlarda malzemenin bir bileşeni olarak kullanılabilir (Gencel vd., 2014).

- **Aerojel,** çok yüksek bir gözenekliliğe sahip kurutulmuş jellerdir. Silika aerojeller çok yüksek sıcaklıklarda değil düşük sıcaklıklarda sol-jel yöntemiyle tek adımda sentezlenir. Aerojellerden olan kserojeller buharlaştırma ile kurutulurken aerojeller süperkritik kurutma ile kurutulur. Genel anlamda aerojel malzemeler yüksek özgül yüzey alanı, çok düşük görünür yoğunluk ve düşük kırılma indisine sahiptir. Aerojellerin ıslak hallerindeki gözeneklilik kurutma sonrasında da kendisini korur. Aerojellerin termal özellikleri sıvı bir ortamda yaşlandırma yapıldığında veya sentezleme yapılırken bir ısıl işleme tabi tutulduğunda yapısal bir evrim geçirebilir.

Granül yapıdaki aerojeller, insan kulağının duyacağı 20Hz ile 20kHz aralığındaki yani duyulabilir sesleri olağanüstü bir şekilde yansıtır ve mükemmel bir ses yalıtım malzemesi olarak kullanılabilir.

Silika aerojellerin yalıtım için mükemmel özellikler göstermesinin yanında bina yapıları gibi maliyetin önem arz ettiği endüstrilerde maliyetli bir malzeme olduğu da dikkat çekmektedir. Şimdiki zamana baktığımızda yapılarda 3 farklı yolla kullanılan aerojel temelli malzemeler vardır. Bunlar; sadece silika aerojellerin üst düzey termal performansları, granülize aerojel tabanlı yarı saydam yalıtım malzemesi ve şeffaf monolitik aerojellerdir (Baetens vd., 2011).

İnorganik ve petrokimyasal yalıtım malzemelerinin bir kısmının özellikleri Çizelge 3.2' de verilmiştir (Kumar vd., 2020).

Çizelge 3.2. Bina yalıtım malzemelerinin özellikleri (Kumar vd., 2020).

Yalıtım Tipi	Yoğunluk	Termal İletkenlik	Özgül Isı Kapasitesi	Buhar Difüzyon Direnç Faktörü	Ses Yutma Katsayısı	Yangına Tepki	Maliyet (P / m^2)	Somut Enerji	Gömülü Karbon
Kavram Simgesi	ρ	k	C_p	μ	a	Φ		EE	EC
Birimi	(kg/cm^3)	(W/mK)	$(J/g\,^oC)$	$(-)$	$(-)$	$(-)$	$(\$/m^3)$	(MJ/kg)	$(kg\,CO_{2\text{-}eq}/kg)$
Cam Yünü	10-100	0,030-0,050	0,8-1	1-1,3	0,45-0,8	A1	9,3-14,7	14-30,8	1,24
Taş Yünü	40-200	0,033-0,040	0,8-1	1-1,3	0,29-0,9	A1-A2	12,0-20	16,8	1,05
Genişletilmiş Polistiren	18-50	0,029-0,041	1,25	20-100	0,22-0,365	E	8,6-17	80,8-127	6,3-7,3
Poliüretan	30-160	0,022-0,035	1,30-1,45	50-100	0,67 veya 0,8	D-F	24,91	74-140,4	5,9
Perlit	32-176	0,040-0,060	0,2	3,5	0,2-0,75	A1	38-42	-	-
Fenolik Köpük	40-160	0,018-0,024	1,3-1,4	35	0,3-0,5	B-C	23	13-159	4,15-7,21

3.2.2. Organik yalıtım malzemeleri

Organik yalıtım malzemeleri petrokimyasal ve yenilenebilir yalıtım malzemeleri olarak ikiye ayrılabilir. Bu grupların altında farklı yalıtım türleri de Başlık 3.2'de bulunan Şekil 3.3' de gösterildiği gibi sıralanır.

3.2.2.1. Petrokimyasal malzemeler

Bu gruptaki malzemeler de geleneksel yalıtım malzemeleri olarak kabul edilir. Genleştirilmiş polistriren, ekstrüde polistiren, poliizosiyanürat, poliüretan, fenol formaldehir, üre formaldehit ve genleştirilmiş polilaktik asit (PLA) petrokimyasal yalıtım malzemeleridir (Durakovic vd., 2020).

- **Genleştirilmiş polistiren,** bir diğer bilinen ismiyle EPS; küçük boncuk benzeri polistiren malzemesinden yapılır. Örnek olarak ise su buharıyla genleştirilen ve genleşme sırasında taneciklerin birbirine bağlanmasını sağlayarak EPS köpük pentan (C_6H_{12}) söylenebilir.

- **Poliüretanlar,** izosiyanatlar ve birden fazla OH (hidrokisil) grubundaki alkolleri oluşturan poliollerle bir reaksiyon vererek oluşur. Genleştirilmiş polistirenlerdeki gibi genleşme işlemleri genleşme gazlarından olan Hidro Florokarbon (HFC), karbondioksit (CO_2) ve pentan (C_6H_{12}) ile gerçekleştirilir.

Yalıtım paneli üretimi esnasında sürekli besleme yapılarak istenilen ölçülerde üretim sağlanır. Isı iletim katsayısı 0,020-0,030 W/mK değerlerinin arasındadır. Termal direnci yüksek olan bu malzeme ile yapılan yalıtım alanlarında gerçekleşen yangın durumunda insan sağlığına çok zararlı olan hidrojen siyanür (HCN) ve izosiyantlar açığa çıkar. Yangın durumunda oluşacak tehlikelere karşı önlemleri kesinlikle alınmalıdır (Jelle, 2011).

- **Fenol formaldehit,** fenol reçinesi ile beraber genleştirme işlemi için genellikle pentan gazı kullanılarak elde edilen yalıtım panelleridir. Fenolik reçine ile çıkarılan bu panellerin üst ve alt yüzeyleri yapışkanlıkları sebebiyle cam elyaflarla desteklenerek kurutulur. Gözeneklilikleri düşüktür bu yüzden ısı yalıtım malzeme özelliklerini iyi yansıtırlar. Ağır yüklere karşı dayanıklı malzemedir (Acun, 2019).

3.2.2.2. Yenilenebilir (Doğal) malzemeler

- **Keten,** dünya çapında farklı iklim koşularında yetiştirilebilen ve farklı endüstrilerde kullanımıyla avantajlar sunabilen bir bitkidir. Özellikle tekstil malzemelerinin üretiminde kullanılır. Kullanım bulduğu diğer sektörler ise kompozit imalatı, jeotekstiller, yalıtım amaçlı ürünlerde ve kağıt üretiminde aktif rol almaktadır. Keten tohumları, boya, vernik, kozmetik ve temizlik malzemelerinin üretiminde kullanılabilir. Keten bitkisinin dış kısmında bulunan kabuklar hayvan yataklarının yapımında kullanılır. Yalıtım adına ise keten-sisal-polipropilen hibrit kompozitleri otomobillerin görünmeyen kısımlarında kullanılmıştır. Daimler-Chrysler Alman otomobil markası araçlarının dış gövdesinde plastik akasamlarında 1992 yılından beri denemeler yaptıklarını, keten liflerini kullandıklarını belirtmiştir (Akin, 2003).

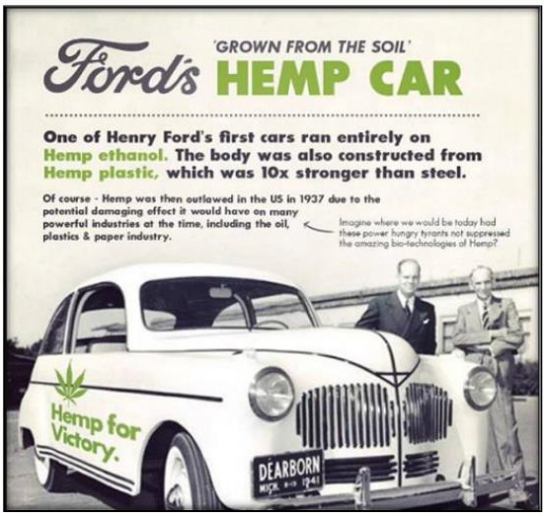
- **Koyun yünü,** yüksek mukavemet, akustik özellikleri, yangına karşı direnç, kapalı ortamları doğal yolla düzenleyen böylece enerji sarfiyatında avantajlar sunabilen fiziksel özellikler koyun yününü mükemmel bir sürdürülebilir (yenilenebilir) bir malzeme konumuna getirir. Koyun yününün yalıtım keçesi amacı ile üretimi cam elyafına nazaran çok daha fazla işçilik ve maliyet gerektirmektedir.

Aynı zamanda yalıtım keçesi üretilirken koyun yününün %40'ı yok olur. Ses yutum katsayısının etkinliği görmek adına elde edilen akustik panellerin kalınlıklarının artmasıyla ses yutum katsayısında da düşüşler olduğu gözlenmiştir (Kumar vd., 2020).

3.3. Doğal Liflerin Kullanım Alanları

Otomotiv, inşaat, havacılık, plastik ve yakıt endüstrilerinde geleneksel sentetik ve petrokimyasal elyafların yerine sürdürülebilir, çevreye duyarlı ve ekonomik açıdan avantajlar sağlayabilen doğal liflerin kullanımı hükümetler tarafından üretim faaliyetleri gösteren kuruluşlar üzerine baskı oluşturmaktadır. Doğal lif yetiştiriciliğiyle Birleşmiş Milletler kırsal bölgelerde yaşamını sürdüren toplumlarda geniş bir istihdam oluşturabileceğini söylemiştir. Bu sebepten ötürü doğal lifler sosyo-ekonomik gelişim üzerinde hayati bir rol alacaktır.

Günümüzde yenilenebilir kaynaklara alternatif olarak doğal lifler sürdürülebilir, biyobozunurluk ve dönüşütürülebilir olmalarıyla ön plana çıkmış ve sentetik, petrokimyasal elyafların yerini almaya başlamıştır. Henry Ford 1940'lı yıllarda kenevir elyaf bazlı kompozitleri oluşturarak bir araç tasarlamıştır. Şekil 3.5' de kenevirden üretilmiş Ford marka aracın görseli verilmiştir (Kaya ve Öner, 2020). Daha sonra 1950'lerde Doğu Almanya üretimi Trabant otomobilinin gövdesi, 1994 Daimler-Benz ve 1996 da Mercedes doğal elyaf takviyeli araç gövdeleri üzerinde tasarımlar geliştirmiş ve kullanmışlardır.



Şekil 3.5. Ford'un kenevir lifi ile geliştirmiş olduğu otomobil (Kaya ve Öner, 2020).

Yapılan çalışmalarda kenevir lifinin hafifliğinin yanı sıra çevre dostu olması ile doğal lif takviyeli kompozit bileşenlerinin tasarımında parça maliyetinde %20, araç ağırlığında ise %30 azalma sağlanmıştır. Düşük yakıt tüketimi, geri dönüştürülebilmesi ve sera emisyonlarında da azalmaya olanak sağlamış çevreci bir ürün olduğunu kanıtlamıştır. Doğal liflerin araçlarda kullanılan parçaları; göstergeler, kapı panelleri, koltuklar, sırtlıklar, kabin kaplamaları gibi iç ortamda geniş bir yelpazeye sahipken dış ortam uygulamaları sınırlıydı. Kenevir lifinden bir kapı üretimine örnek Şekil 3.6' da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Kenevir lifi ile üretilen bir otomobil kapısı (Peças vd., 2018).

Avrupada otomotiv endüstrisinde daha yoğun olarak kullanılan doğal lifler keten ve kenevirdir. Bangladeş ve Hindistanda jüt ve kenaf doğal lifleri, Filipinlerde muz, Güney Afrika, Amerika Birleşik Devletleri ve Brezilyada sisal üretimleri yapılarak ithal edilmektedir (Peças vd., 2018).

150 yıllık fosil yakıt arayışları ve kullanımlarının sınır noktasına ulaşmakta olan dünya alternatif yakıt ürünleri arayışına girmiştir. Alternatif kaynakların fosil yakıtlara kıyasla daha sürdürülebilir, ekolojik ve daha uygun maliyetli olması bu kaynakları daha çekici kılmaktadır.

Fosil yakıtların üretimi ve kullanımı esnasında canlı hayatının sürdüğü ekolojide kirli gaz salınımları çevreye ve troposfere zarar vermekte ve aynı zamanda dolaylı yollardan ozon tabakasını da tüketmektedir. Ozon tabakasının tükenmesi ile beraber çevre sorunları, iklim değişiklikleri ve küresel ısınma gibi sorunlar ortaya çıkmıştır.

Otomotiv sektöründe Henry Ford tarafından kullanılan kenevir bitkisi aynı dönem içerisinde yine kenevir ile biyoyakıt kullanımını gerçekleştiren ilk kişi olmuştur. Tin Lizzie adlı model otomobilde bazen benzin bazen ise kenevir bazlı biyoyakıt kullanılmıştır. İlerleyen süreçte keşfedilen ham petrol ile 20. Yüzyılda sürdürülebilir biyoyakıt temelinde otomobil yaratma düşüncesinin önüne geçilmiştir.

Kenevir bitkisi yüksek yoğunluklu ve üretim kolaylığıyla hızlı büyümesi ile biyoyakıt ürünleri için uygun görülmüştür. Kenevirdeki emilebilen şekerlerin lignine oranı, benzerlik gösteren diğer biyoyakıt ürünlerine kıyasla daha yüksektir. Bu biyoyakıt kenevir tohumu yağından elde edilir (Karche ve Singh, 2019).

Kenevirden yapılan konut yapı ya da yalıtım malzemeleri geleneksel sentetik yalıtım malzemelerine popüler bir alternatiftir. Kenevir sürdürülebilir bir malzemedir ve bunun yanında geleneksel yalıtım malzemelerine göre karbon negatiftir. Yani salınandan daha fazla karbonun atmosferden geri çekilmesi ile ekolojik, iklim değişiklikleri ve küresel ısınma gibi dünya habitatına katkı sağlamaktadır.

Kenevir beton üretiminde de kullanılmıştır. Kenvir ile beton, duvardan bina çatı yalıtımına ve iç mekânda döşemeye kadar çeşitli ihtiyaçlara alternatif oluşturmuştur. Yukarıda da söylendiği gibi karbon negatif olan kenevir ile elde edilen kenevir beton doğal yalıtım malzemesi, nem düzenleyici, geleneksel tuğlalara nazaran kırılganlığının olmamasından ötürü genleşme derzleri gerektirmeden kullanılabilmektedir.

Bina yapılarında kenevir lifi daha çok kompozit malzeme olarak üretilmektedir. İnşaat endüstrisinde en yaygın olarak kullanılan kompozit malzeme alanları; çatı konstüksiyonları, kapı çerçeveleri, kanopiler ve pencere çerçevelerini söylenebilir. Doğal elyafları sadece ekolojik olmakla kalmaz geleneksel malzemelere kıyasla üretim

aşamalarında kullanılan alet, teçhizat ve makinelere zararları ve insan gücü kullanılan alanlarda solunum sisteminde olumsuzluklar sunmaz.

Doğal liflerin yoğunlukları (1,5 g/cm^3) cam lifinden (2,5 g/cm^3) önemli ölçüde düşüktür. Düşük yoğunluklu lifler ile belirli bir dizilim sağlanarak düşük termal iletkenlikler elde edilebilir. Hempcrete (kireç-kenevir karışımı) karışımı ile 4-6cm kalınlığında bir duvar kaplaması duvarın ısıl düzenlemesini sağlarken pürüzlülüğü de düzeltebilir. Bir inşaat malzemesi olarak kullanılan alanlara yönelik farklı oranlardaki kireç ve kenevir karışımı çatı, zemin ve ahşap çerçevelerde kullanılabilir. Halihazırda bulunan bir binanın dış cephesinde de kullanılarak yalıtım özellikleri kazandırılabilir.

Kenevir lifi, diğer geleneksel ve tükenmekte olan yalıtım malzemelerini karşısına aldığında büyük bir Rönesans dönemi geçirmektedir. Bu Rönesans etkisi sadece doğal özelliklerinden değil aynı zamanda enerji tasarrufu ve çevresel faydaların da getirisidir. Otomotiv endüstrisinde kullanılan kenevir inşaat endüstrisine de katkı sağlamakta ve gelişen teknoloji ile birlikte bir çok farklı alanda bu pazarın genişlemesine olanak sunmaktadır (Nunes, 2017).

Kâğıt, kimyasal yöntemler veya mekanik yöntemlerle bitki biyo yapısından ekstrakte edilen selülozik lif ağ yapısından oluşan bir kompozit malzemedir. Lifli malzemelerin kullanıldığı gibi kâğıt üretiminde lif içeriği olmayan malzemelerin kullanımıyla çeşitli özellikler kazandırılan yeni ürünler ortaya çıkarılabilir. Küresel kâğıt tüketimi gün geçtikçe artış sağlamakta ve bu artış gelişen teknoloji, demografik büyüme, sanayi alanındaki yenilikler ve eğitim gibi konular ile bağlantılıdır. Arz talep vakıalarına göre artan kâğıt üretimi göz önünde bulundurularak 2030 yılına kadar yıllık %1,1 oranında sabit bir yükseliş sergileyeceği öngörülmektedir.

Kâğıt üretiminde kullanılan hammddelerin, selüloz, hemiselüloz ve lignin olmak üzere üç temel bileşeni vardır. Kâğıt üretiminde daha çok önem arz eden bileşen ise selülozdur. Biyokütledeki selüloz miktarı ne kadar fazla ve lignin içeriği ne kadar az olursa, kâğıdın mukavemeti daha yüksek olacaktır. Bu da kâğıdın daha kullanılabilir bir yapı kazanmasını sağlayacaktır.

Bulunduğumuz süreçte kâğıt hamuru ve kâğıt pazarının gereksinimlerini lignoselülozik bileşen tarafınca daha yoğun olan odunlar kullanılmaktadır. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO)' ne göre odunların kullanımı ile üretilen kâğıt hamuru ve kağıtlar ile başta ormanlık alanlarımızın azalması ve çevresel kaygıları beraberinde getirmektedir. Dünya çapında her yıl ortalama olarak $1{,}3x10^{11}$ m^2 ormanlık alanın yok edildiği ve kesilen ağaçların ortalama %40'ının sadece kâğıt üretiminde kullanıldığı tahmin ediliyor. Ormanlık alanların tahribatı habitat açısından çok büyük olumsuzluklar getirmektedir. Bunların başında; ekosistem bozulması, bazı türlerin yok olmasına sebep olabilecek habitat kayıpları ve sera gazı etkisinin yaklaşık %15'inin ormanlık alanların yok edilmesinden kaynaklanan küresel ısınmalardır (Amode ve Jeetah, 2021).

Geleneksel kâğıt üretim malzemelerine kıyasla kenevirden elde edilen kenevir kağıt daha yüksek mukavemet, uzunluk ve incelik özelliklerine sahiptir. Üretim aşamasında yine geleneksel kâğıt üretim metotlarına göre daha az kimyasal malzeme kullanılarak üretilir. Kenevirin uzun bast lifleri kenevir kâğıt üretiminde asit içermeyen yapısından dolayı daha kalite bir kâğıt üretimi sunar. Geleneksel kağıtlar gibi zamanla sararmaz ve dağılmaz. Kenevir yetiştiriciliği kâğıt üretiminde kullanılan ağaçlara kıyasla daha hızlı üretim sunup hasat sağladığı için tercih sebebi olmaktadır. Kenevir kağıtlar; formlarda, döviz kağıdında ve sigara üretimi için uzun süre depolama gerektiren malzemelere yüksek kalite ve dayanıklılık sağlar. Kenevir hamurunun maliyeti geleneksel kağıt malzemelerine nazaran üç ile altı kat daha maliyetlidir. Bunun sebebi ise kenevirin atık olarak kabul edilen bast liflerinden yapılıyor olmasıdır. Bast lifleri kenevir sapının ortalama %20-30' unu içermektedir. Bir diğer faktör ise kenevir haşatından sonra üretime alınmayan liflerin depolanmasıdır.

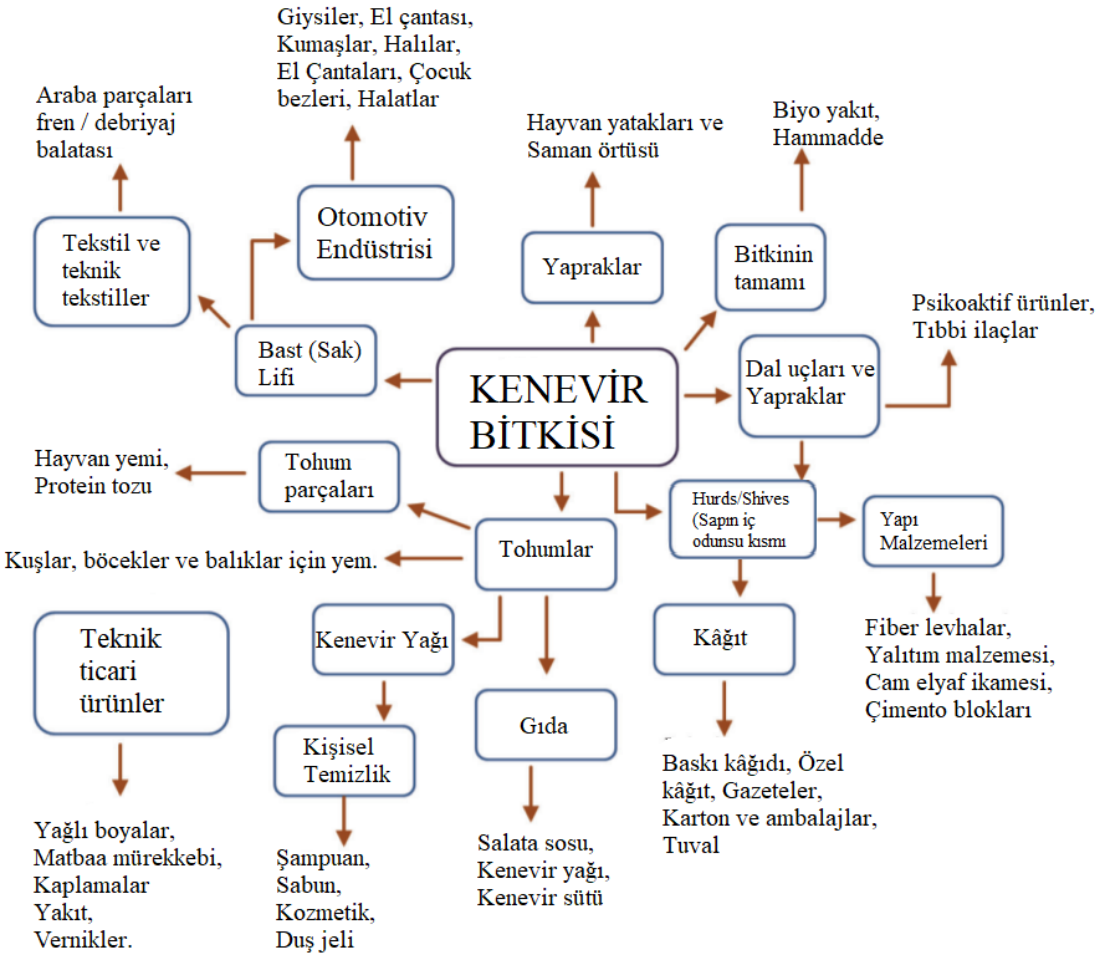
Kenevir lifi ile elde edilen kağıtlar teknik filtreleme sistemleri, banknotlar, incil kağıdı, dielektrik ve tıbbi kağıt, sigara kağıdı, çay poşeti kağıdı, kahve filtresi, yağlı kağıtlar, karbon kağıt mendillerde kullanılır. Filtreleme üzerine yapılan çalışmalar kenevirin bu alanda gelecek vaat eden bir malzeme olduğunu göstermiştir. Otomobil yağ ve hava filtreleri için tasarlanan kenevir lif içerikli filtreler düşük kalınlık, ağırlık, gözeneklilik, filtreleme verimliliği ve yağ/hava penetrasyonuna sahip olduğunu ortaya koymuştur. Sonuç olarak otomobillerde kullanılan pamuklu kağıtların yerine daha performaslı yağ/hava filtreleme özelliklerine sahip kenevir kağıtlar ön plana çıkmıştır (Crini vd., 2020).

Kenevir ile ilgili oldukça fazla avantaj bulunmaktadır. Bunların içinde kenevir tohum yağlarının piyasa değerini artırmaktadır. Bu yağlar ile sadece gıda üzerine değil kozmetik, cilt bakım ürünleri, aromaterapi ve tıp alanında kullanımı mümkündür. Günümüzde kullandığımız kozmetik malzemelerinin içeriğinde bulunan petrol türevli bazı maddelerin yerini kenevir yağları alabilir. Cilt nemlendirici, el koruyucu kremleri, el dezenfektanları ve vücut jelleri gibi geniş kozmetik ürünlerine doğal ürün ve tüketim açısından büyük bir alternatiftir.

Kenevir tohumundan elde edilen yağlar ve kenevir özleri yüksek antioksidan özellikleriyle de ön plana çıkmayı başarmıştır. Yatıştırıcı, baştan yapılandırıcı, içerik olarak doğal yumuşatıcı etkisi, nemlendirici özellikte olması vücut bakımları için uygundur. Kozmetik ve temizlik ürünleri içerisinde de yer alan kenevir, sabunlarda, şampuanlarda, kremlerde, vücut losyonlarında, saç kremlerinde, parfümlerde, rujlarda hatta ve hatta güneşsiz bronzlaştırıcılarda doğal bir ürün kullanımı sunmaktadır. Bu ürünlerin doğallığını bozacak olan Tetrahidrokannabinol (THC) ve paraben bulundurulmaz. Son yapılan bir çalışmada ise kenevirden elde edilen bu yağların ciltteki kırışıklıkları azalttığı ve cilde genç bir görünüm kazandırdığı iddia edilmiştir (Crini ve Lichtfouse, 2012).

3.4. Kenevir Lifi

Binlerce yıldır insanların yerli üretim kaynaklarından biri olmuş kenevirin kolay yetiştirilmesi, tropikal ve ılıman iklimlerde hızlı büyümesi ve ekim ve hasat sonrasında toprağı zenginleştirmesi bu bitki yetiştiriciliğine ilgiyi artırmıştır. Eski zamanlarda farklı kullanımlara hizmet etmiştir. Bunlara örnek olarak ip, kâğıt ve yelkenin yanı sıra en yaygın kullanılan tahıllardan birisi olmuştur. Şekil 3.7’ de kenevir bitkisinin farklı kısımlarının hangi endüstrilerde rol aldığı görülmektedir (Karche ve Singh, 2019).



Şekil 3.7. Kenevir bitkisine ait kısımların farklı sektörlerde kullanımı (Karche ve Singh, 2019).

Geleneksel yalıtım malzemelerinin yerine doğal ve sürdürülebilir bir lif olan kenevir lifi bir takviye malzemesi olarak seçilmiş, matris ise poliüretan reçine olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak geleneksel ısı yalıtım malzemelerine çok yakın ısı iletim katsayılarını vermiştir. Buna göre sürdürülebilir bir ısı yalıtım malzemesinin bina yapılarında kullanımı için umut verici alternatif haline gelmiştir (Sair vd., 2018).

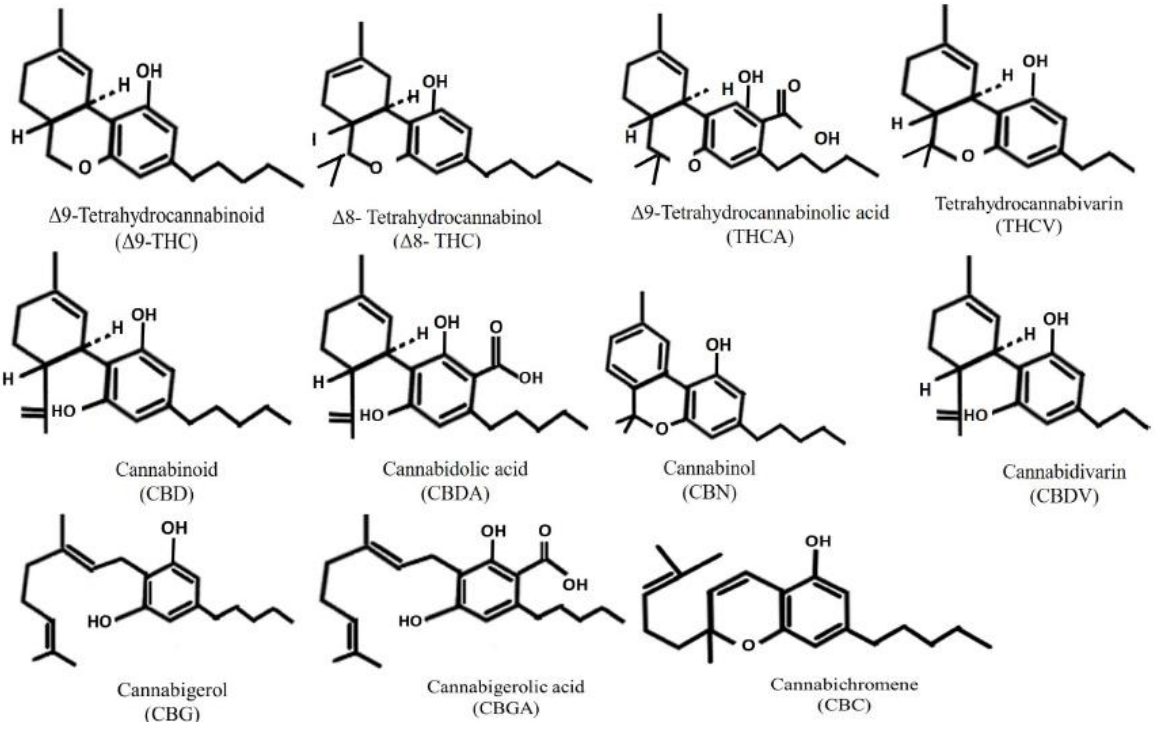
Sürdürülebilir bina yalıtım malzemelerinin bir kısmının özellikleri Çizelge 3.3' de gösterilmiştir (Kumar vd., 2020).

Çizelge 3.3. Farklı lif malzemelerinin bazı özellikleri ve karşılaştırmaları (Kumar vd., 2020).

Yalıtım Tipi	Yoğunluk	Termal İletkenlik	Özgül Isı Kapasitesi	Buhar Difüzyon Direnç Faktörü	Ses Yutma Katsayısı	Yangına Tepki	Maliyet (P / m^2)	Somut Enerji	Gömülü Karbon
Kavram Simgesi	ρ	k	C_p	μ	a	Φ		EE	EC
Birimi	(kg/m^3)	(W/mK)	$(J/g\,^oC)$	$(-)$	$(-)$	$(-)$	$(\$/m^3)$	(MJ/kg)	$(kg\,CO_{2\text{-}eq}/kg)$
Bambu Lifleri	431-538	0,077-0,088	1,79-1,96	8,7-15,4	0,2-0,56				
Mısır	148-257	0,101-0,139	1,48-1,72	5,2	0,2-0,8				
Keten	20-100	0,033-0,090	1,6	1-5,28	0,54-0,84	C	15.18	39,5	20
Kenevir	25-100	0,039-0,123	1,7-1,8	1,0-10	0,52-0,6	E	15-19.4	18,71	0,14
Kenaf	30-180	0,026-0,044	0,21-1,7	1,2-2,3	0,3-0,95	E	-	22,7-39,06	0,59-2,09
Jüt Lifleri	-	0,05	-	-	0,2-0,56	-	-	21,11	0,56

3.4.1. Kenevir liflerinin biyokimyasal özellikleri

Bitkilerin biyokimyası, moleküler düzenekleri, kimyasal oluşumları ve alakalı kimyasal prosesleri, hücre bileşenleri ve etkileşimlerini belirler. Kenevir (Cannabis Sativa L.) mikrofibrillerle hizalanmış selüloz polimerik bağlara sahip en temel düzenekten oluşur. Birinci metabolitler diğer bitkilerle çok benzerlik gösterse de ikinci metabolitler farklıdır ve kenevir için en önemli olan ikinci metabolitlerdir. Kanabinoidler kenevirlere özgü terpenofenolik bileşiklerdir. Bu bitkinin oluşumu sırasında hava yüzeyinde oluşan glandüler trikomlar tarafından üretilir. İkincil doğal kimyasalların katkıları kanabinoidler tarafından 450 tane üretilir. Şimdiye kadar 90 adetten fazla kanabinoid bildirilmiştir ve en yoğun olanları Şekil 3.8' de gösterildiği gibi; Tetrahidrokannabinolik asit, kannabidiolik asit, kanabinolik asit, kanabidgerolik asit, kannabikromik asit ve kannabinodiolik asittir. Bu terpenofenolik bileşikler kenevir bitkisinin uyarıcı etki veren esrara özgüdür ve esas olarak glandüler trikomları tarafından üretilir.



Şekil 3.8. Kenevir bitkisine bağlı olarak en çok elde edilen kannabinoidler (Karche ve Singh, 2019).

Kenevir bitkisinin biyokimyasal özelliklerinin bilgisi önem arz etmektedir. Çünkü yapılan çalışmalar, sürdürülebilir kalkınma planları için bir hammadde olarak öneminin daha da artacağını ve farklı endüstrilerle beraber tarımda da daha fazla bir kullanım sağlayacak ve gerçekleştirilen modifikasyonlarla geniş bir alan için temel oluşturacaktır. Yakın geleceğimizde yapılacak olan biyokimya alanındaki gen teknoloji çalışmalarını iyileştirmesi, kannabinoid seviyelerini sabit kalmasına yardımcı olması, kimyasal varyasyonların manipüle edilebilmesi ve yakın gelecekte çeşitli ürünler için sürdürülebilir teknolojilere büyük katkılar sunacağı beklenmektedir (Karche ve Singh, 2019).

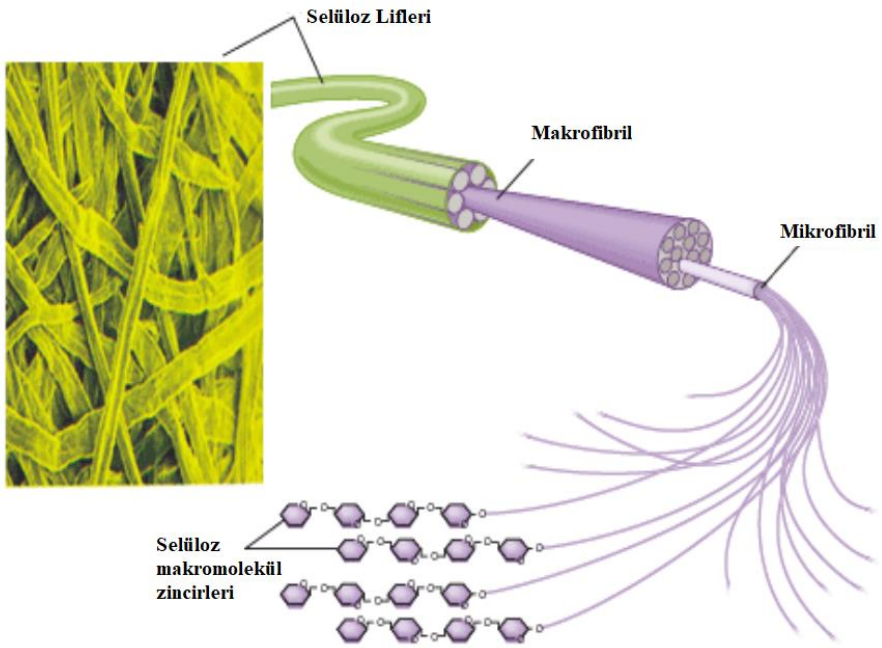
3.4.2. Kenevir liflerinin kimyasal özellikleri

Kenevir saplarının kimyasal bileşenlerinin dağılımı, dış bast ve odunsu çekirdek arasında önemli ölçüde değişim gösterir. Kenevir lifleri %60-70 selüloz, %15-20 hemiselüloz, %2-4 lignin, %2-4 pektin ve %1-2 yağlardan ve balmumundan oluşur. Odunsu çekirdek kısmındaki bileşimlerin oranları ise; %40 selüloz, %20 hemiselüloz, %20 lignin içerir ve daha sert yapıdaki ağaçlarla benzerlik gösterir (Horne, 2020). Çizelge 3.4' de kenevir ve diğer doğal liflerin kimyasal bileşimleri verilmiştir.

Çizelge 3.4. Kenevir lifi ve diğer liflerin kimyasal bileşimleri (Manaia vd., 2019).

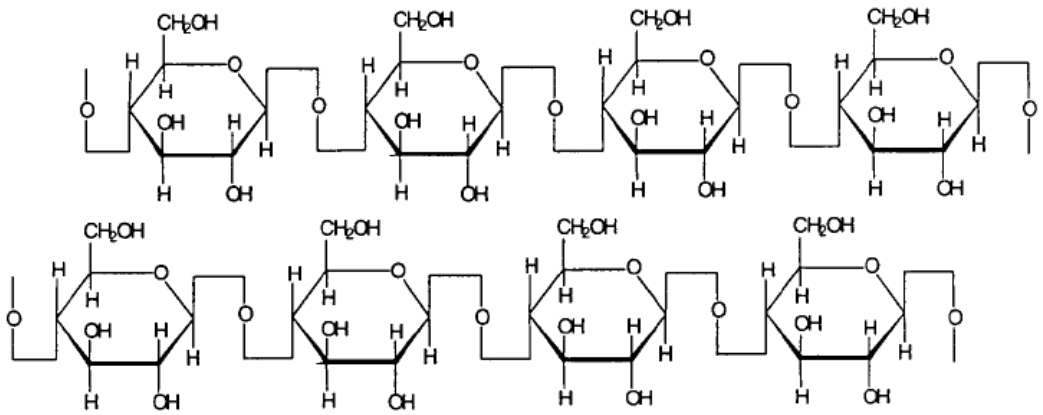
Fiber	Köken	Selüloz (%)	Lignin (%)	Hemiselüloz (%)	Pektin (%)	Vaks (%)	Kül (%)	Mikrofiber Açıları
Kenevir	**Bast**	**70-74**	**3,5-5,7**	**15-20**	**0,8**	**1,2-6,2**	**0,8**	**2-6,2**
Jüt	Bast	61-72	12-13	18-22	0,2	0,5	0,5-2	8
Sisal	Yaprak	78	8	10	-	2	1	-
Keten	Bast	64-72	2-2,2	18-20	1,8-2,3	-	-	5-10
Rami	Bast	69-91	0,4-0,7	5-15	1,9	-	-	7,5
Herake	Yaprak	56-64	7.8	23-31	-	-	-	-
Hindistan cevizi	Meyve	36-43	0,15-0,25	41-45	3-4	-	-	30-49
Kenaf	Bast	45-57	22	8-13	0,6	0,8	2-5	2-6,2

Bitki lifleri temel olarak bileşimlerinde bulundurdukları lignin ve pektin ile birleştirilmiş şeker bazlı polimerler yani selüloz ve hemiselülozlardan oluşur. Bu bitki bileşimlerinde yağlar ve balmumu gibi safsızlıklara da rastlamak mümkündür. Aynı zamanda yapısal su da bulundurabilirler. Bitkilerin farklı kısımlarının bileşimlerindeki oranları iklim koşulları, yaşları ve bozunma süreçleri gibi faktörler etkiler. Bitki yapısında bulunan farklı makromoleküller arasında bulunan hidrojen bağları, yapıya kristal özellikler katarken çeşitli fiziksel özellikler de sağlar. Sonuç olarak, selüloz yarı kristal bir yapıdadır. Selülozun mikroyapısı Şekil 3.9' da gösterilmiştir. Hem yüksek kristalli hem de amorf bölgeleri vardır. Doğal elyafların birçoğu, mikrofibrillerin mikrofibril açısı da denilen yapı elyaf eksenine göre bir açıyla yönlendirilmelerini sağlar. Bu açı, elyafların mekanik dayanımları üzerinde büyük etkilere sahiptir. Bu açı ne kadar düşükse mekanik davranışlar da o kadar iyi olacaktır (Manaia vd., 2019).



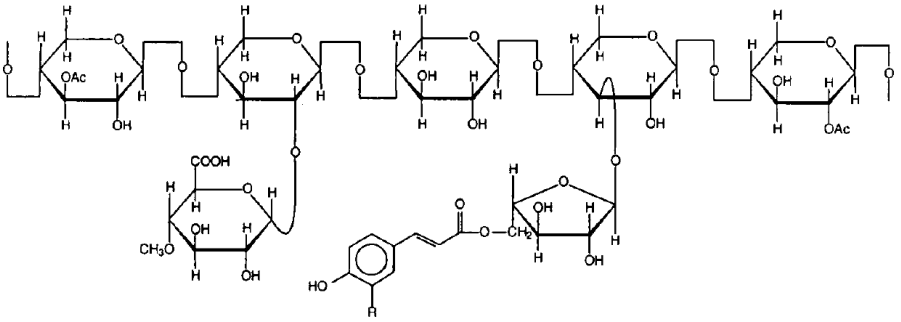
Şekil 3.9. Selülozun mikro yapısı (Bulut ve Erdoğan, 2011).

- **Selüloz,** tekrarlayan glikoz birimlerinden oluşan Şekil 3.10' da gösterildiği gibi homojen ve doğrusal bir polimerdir. Kristal yapıda olan selüloz enzimatik hidrolize dayanıklı bir polisakkarittir. 6µm uzunluğuna doğal olarak ulaşabilen en büyük polimerdir. Selülozun temel görevi bitkiye dayanım sağlamaktır. Zincirler arasındaki yüksek miktardaki hidrojen bağlarıyla, selüloz lifleri eksenel yönde yüksek gerilme mukavemeti sergiler. Selüloz sadece mikrofibrillerde bulunur ve asla tek tek moleküller olarak bulunmazlar.



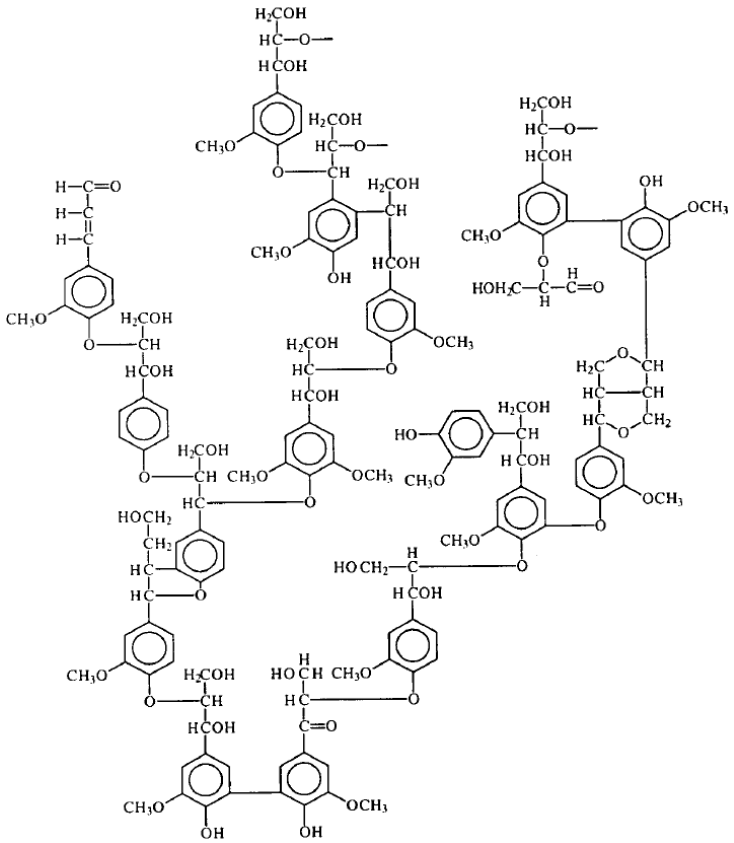
Şekil 3.10. Glikoz monomerlerinden oluşan selüloz molekülü. Paralel selüloz zincirleri, kristalli mikrofibrillerle sonuçlanan hidrojen bağları oluşturur (Thomsen vd., 2005).

- **Hemiselüloz;** alkali solüsyonlarda ekstrakte edilebilir. Bitki bileşiminde bulunan hemiselülozun göre selüloz ve lignin arsındaki bağlantıyı sağlamaktır. Selülozda homojen bir yapı varken hemiselülozda selülozdan farklı olarak pentoz şekerleri yani beş karbon atomlu monosakkarit diye adlandırdığımız şekerlerden oluşan Şekil 3.11' de de görüldüğü gibi heterojen ve dallı bir yapıya sahiptir. Amorf yapıdaki bu maddenin hidroksil grupları selüloza kıyasla suya daha fazla ulaşır. Suya daha iyi bir ulaşım sağladığı için hemiselülozun higroskopikliğine büyük katkı sağlar.



Şekil 3.11. Odunsu olmayan liflerdeki (otlar) hemiselülozun yapısı 4-O-metil glukuronik aside a-1,2 bağı ile asetillenmiş ksilen zinciri (sol yan grup) ve aynı zamanda fenolik aside bağlı olan L-arabinofuranoza α-1,3 bağı ile (sağ taraf grubu) gösterilmiştir (Thomsen vd., 2005).

- **Lignin;** fenolik bileşenleri bulunduran lignin sayesinde böcek ve memeli otçullara karşı güçlü, patojenlerin saldırı ve tüketimlerine karşı koruma sağlayan bir yapıda olması sebebiyle genellikle selüloz mikrofibriller arasında bulunan güçlendirici bir malzemedir. Lignin yüksek molekül ağırlığı ve karmaşık yapısı ve hemiselüloz ile iyi bir yapışma özelliği gösterdiği için çoğu çözücüde çözünmez. Lignin molekülüne ait yapı Şekil 3.12' de gösterilmiştir.



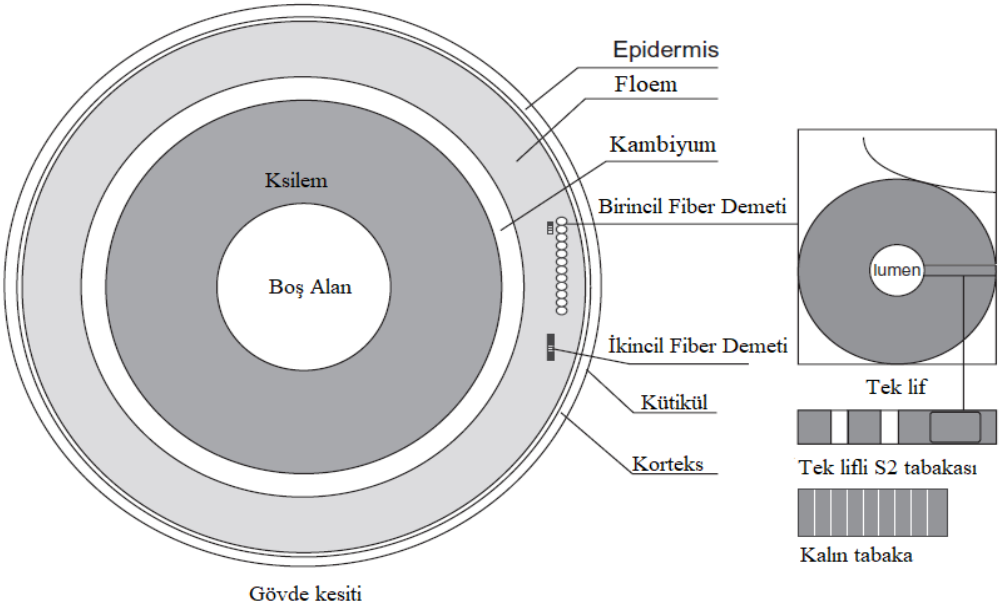
Şekil 3.12. Lignin molekülü, muhtemelen her zaman değişken olan karmaşık bir yapıya sahiptir (Thomsen vd., 2005).

- **Balmumu;** bitkilern çok büyük bir kısmı uzun zincirli alkan, ester ve alkol mumları ile yarı kristalli balmumu ile kaplıdır. Ester ve yağ asitleri bitkilerde yaygın olarak görünür fakat az miktarda bulunurlar. Alkoller balmumunun büyük bir kısmını oluşturur. Balmumunun bitkiye kazandırdığı özellik bitkideki su kaybını önlemek ve yaprakların yüzeyindeki sıvıları uzaklaştırmaktır. Balmumu aynı zamanda bitki koruması için bir kaplama olarak da gösterilebilir. Çünkü böceklerin bitkiye olan zararlarının önüne geçmek için etkin bir malzemedir.

- **Kül;** ana bittkinin lif mineralleri arasında Kalsiyum (Ca), Potasyum (K), Fosfor (P) ve Magnezyum (Mg) bulunur. Odun kısmı daha yumuşak olan ağaçlardaki mineral içeriği ağırlıkça %0,02 – 1 aralığında, sert ağaçlarda ağırlıkça %0 – 5 aralığındadır. Bitki liflerinde bulunan bu mineral içeriği, agronomik faktörlere ve toprak kirlenme miktarına bağlıdır (Thomsen vd., 2005).

3.4.3. Kenevirin fiziksel özellikleri

Kenevir sapının çapı çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunlar toprak, bitki yoğunluğu, türler ve çeşitli başka faktörler de söylenebilir. Çap ise 0,6 ile 4,5 cm arasında değişim gösterir. Kenevir lifleri, dış kabukları sapları olduğu sürece demetler halinde bulunurlar ve ksilem adı verilen yapıdan elle soyma veya mekanik yöntemlerle kolayca sıyrılarak çıkarılabilir. Sapın dış kısmında epidermis tabakası bulunur. Bu epidermis tabakası bitkiyi kurumaya karşı korumak için balmumu ve bitkinin havalandırdığı, buharlaşmayı düzenlediği, renk bağlayıcı özelliklerin bulunduğu ve stomalar içeren 2-5 μm'lik yüzey tabakası kütikülü ile kaplıdır. Korkteks tabakası lif içermeyen fakat klorofil bulunduran ince duvarlı hücre bakasıdır. Aşağıdaki Şekil 3.13' de kenevir sapının morfoloji verilmiştir.



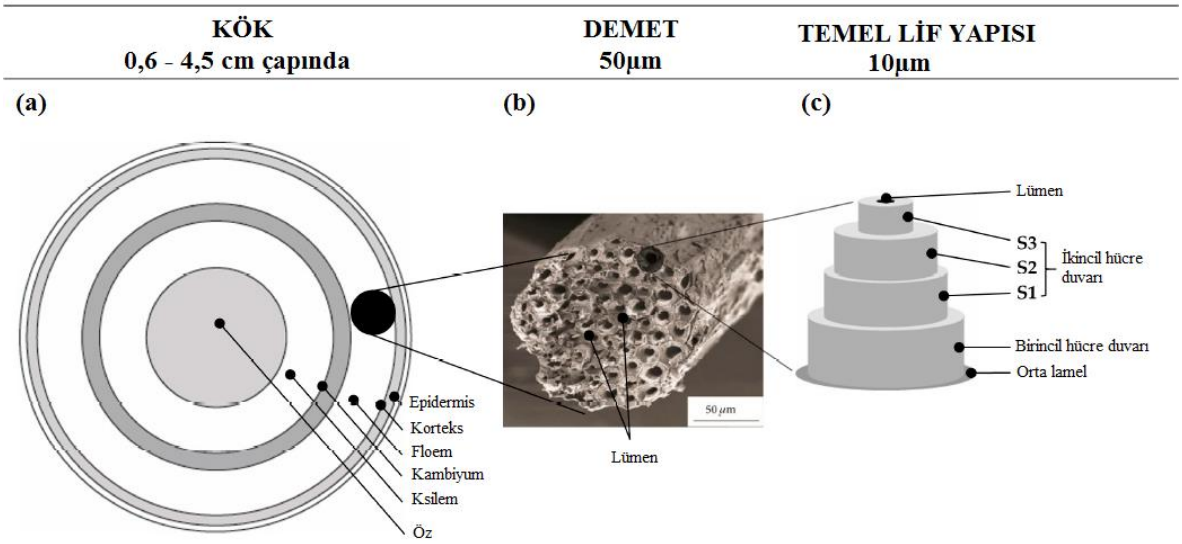
Şekil 3.13. Tek lifi, ikincil hücre duvarını ve son olarak hücre duvarı lamelini yakınlaştıran enine kenevir kök bölümünün modeli (Nunes, 2017).

Floem tabakası, klorofil bulunduran kısa hücrelerle sak elyaf bulunduran uzun hücreler bulundurur. Kambiyum tabakası (10-50µm), iç kısmında hurd, dış kısmında bast ve kabuk üreten olgunlaşma alanıdır. Bir değişim tabakası olmasına rağmen, aynı zamanda çürüme ve veya kırılma işlemleri sırasında liflerin ve hurd denilen sapın iç odunsu kısmının ayrıldığı bir kesilme tabakasıdır. Ksilem, bitkinin orta kısmında 1-5mm kalınlığında iç boş bir silindir yapıdır. Eklemler dışında gövde boyunca uzanır (Nunes, 2017).

Kenevir liflerinin kesiti uzunluğu boyunca düzensiz bir yapıya sahiptir. Floem Şekil 3.14.a' da bitkinin boyunca uzanır. Yapısındaki bileşimler yaklaşık olarak %70-74 selüloz, %15-20 hemiselüloz, %3,5-7 lignin, %0,8 pektin ve %1,2-6,2 balmumu içerir ve bu lifler birincil lif olarak adlandırılan bast lifleridir. Floem ayrıca kambiyum tabakasından kaynaklı ikincil bast liflerini içerir.

Kenevir lifi tek bir katmandan oluşmaz. Şekil 3.14.b' de görüleceği üzere çok hücreli bir yapıya sahip olan kenevir lifi çok sayıda lümene sahip olmasından ötürü kompozit bir malzeme olarak görülebilir. Şekil 3.14.c' de kenevir lifinin tipik bir yapısı gösterilmiştir. Kenevir lifinin hücre duvarı çok katmanlıdır. Bu hücre duvarına birincil hücre duvarı yani hücre gelişimi sırasında biriken ilk katman denir ve ikincil katman S ve üçüncü katman S3 olarak adlandırılır. En temel lifler bitkinin orta lamelinde lignin ile birbirine bağlanır.

Maksimum selüloz konsantrasyonu yaklaşık %50 miktarında S2 dedir. S2 katmanlar arasındaki en kalın olanıdır ve en fazla selüloz konsantrasyonu bu katmandadır. Bu yüzden lif özelliklerini de kontrol eder (Manaia vd., 2019).



Şekil 3.14. Kenevir lifinin yapısı: (a) enine kenevir sapı bölümü, (b) kenevir lifi demetinin enine kesit morfolojisi ve (c) kenevir temel lifinin şematik gösterimi (Manaia vd., 2019).

3.4.4. Kenevir sapından lif eldesi

Kenevir bitkisinin sapından elde edilen kenevir liflerinin kalitesini ve miktarını, liflere uygulanan havuzlama yöntemi belirler. Pratikte kenevir liflerinin havuzlanması üzerine dört farklı yöntem vardır. Bunlar tarlada bekleterek havuzlama, su ile havuzlama, enzim kaplama ile havuzlama ve kimyasal işlemlerle havuzlamadır. Bu yöntemler seçilirken öncelik olarak bölge ve son kullanımda gerekli olacak mahsul önemlidir.

- **Tarlada bekleterek havuzlama yöntemi;** kenevir bitkileri kesildikten sonra bir sonraki yetiştiricilik ve üretim süreci ele alınarak 2 ya da 8 hafta boyunca tarlada bekletilir. Belirli zaman aralıklarıyla hava koşulları, ışık ve sıcaklığa eşit şekilde maruz bırakmak için kenevir sapları alt üst edilir. Tarlaya serilen bitki üzerinde mantarlar ve bakteriler gövdeleri kolonize eder ve lifleri çevreleyen orta lamelde bileşenleri bozacak olan özellikle pektinolitik eznim ile polisakkarit parçalayıcı enzimleri üretir. Tarlada bekleterek havuzlama yöntemi için kritik olan, yeterli düzeyde sıcaklık ve nemin var olmasıdır. Bu nedenle sadece uygun coğrafi alanlarda

gerçekleştirilebilir. Avantajlarından birisi tarımsal verimlilik ve düşük maliyetli olmasıdır. Dezavantajlarından birisi ise tarlanın bir sonraki üretim için tarlada bekletilen kenevir bitkilerinin engel teşkil etmesidir.

- **Su ile havuzlama yöntemi;** genellikle kısa süreli en iyi ayrılmanın olduğu kenevir lif çıkarma yöntemlerinden birisidir. Geleneksel yöntemlerde nehirlerde ve akarsularda su ile havuzlama yapılırken artık yakın zamanda su tanklarında bu işlemler gerçekleştiriliyor. Tank bazlı su ile havuzlama yönteminde soğuk su kullanımı ile ıslatma işlemi 7-14 gün arasında sürer lakin suyun sıcaklığı 30-40°C' ye getirildiğinde 4-5 gün sonunda işlem sonlandırılabilir. Bu yöntemin en temel avantajı kontrol edilebilir olmasıdır. Kontrol altındaki bitki işleme yöntemi ile kenevir saplarının eşit şekilde bu işleme tabii tutulmuş olmasına olanak sağlamıştır. Ayrıca tarlada bekleterek havuzlama yöntemine kıyasla çok daha verimli bir kenevir lifi elde edilmiştir. Dezavantajı ise çok fazla suyun harcanmasıdır. Kullanılan sular tekrar kullanım için geri çekildiğinde çok kötü bir kokuya sebep verir. Ayrıca enerji maliyetlerine neden olabilen su çekme işleminden sonra elyafların da kurutulması gereklidir. Avrupa'da su kullanımı ile işleme çevresel kaygılar ve elyafların havuzlamadan sonra yapay olarak kurutulması yüksek maliyetlere sebep olduğundan yüksek oranda bu yöntem sonlandırılmıştır.

- **Kimyasallar ile havuzlama yöntemi;** bu yöntemde genellikle Etilendiamin tetraasetik asit (EDTA) gibi şelatlama maddelerinin kullanımı, sodyum hiroksit (NaOH) çözeltisiyle gerçekleştirilir. Sodyum Karbonat (Na_2CO_3) ve Sodyum Sülfit (Na_2SO_3) gibi diğer kimyasallarda tercih edilip kullanılabilir. Kullanım amacı ise bitkilerde bulunan balmumu, yağlar ve zamkların giderimidir. Bu yöntem tarlada bekleterek havuzlama ile su ile havuzlamadaki avantajların hepsine sahiptir fakat işleme süresi olarak su ile havuzlamaya kıyasla sadece birkaç saat daha erken gerçekleştirilir. Kenevirin kimyasal olarak işlenmesi kenevir lifinin daha kaliteli olmasının yanında getirdiği maliyet etkileri de kullanılan kimyasallar tarafından ortaya çıkmaktadır. NaOH ile işlenmiş kenevir liflerine ait bileşim içeriklerini veren Çizelge 3.5 aşağıdaki gibidir.

Çizelge 3.5. Oda sıcaklığında (RT) veya kaynatıldığında (B) NaOH ile muamele edilmiş kenevir lifinin kimyasal bileşimi ve ağırlık kayıpları.

		Selüloz (%)	Hemiselüloz (%)	Lignin (%)	Ağırlık kaybı (%)
İşlenmemiş lif		76,12	12,28	5,65	
%5 NaOH	RT (Oda sıcaklığı)	83,63	7,49	2,61	4,4
%5 NaOH	B (Kaynatılmış)	89,16	1,93	2,07	25,5
%18 NaOH	RT (Oda sıcaklığı)	86,18	3,83	2,44	14,1

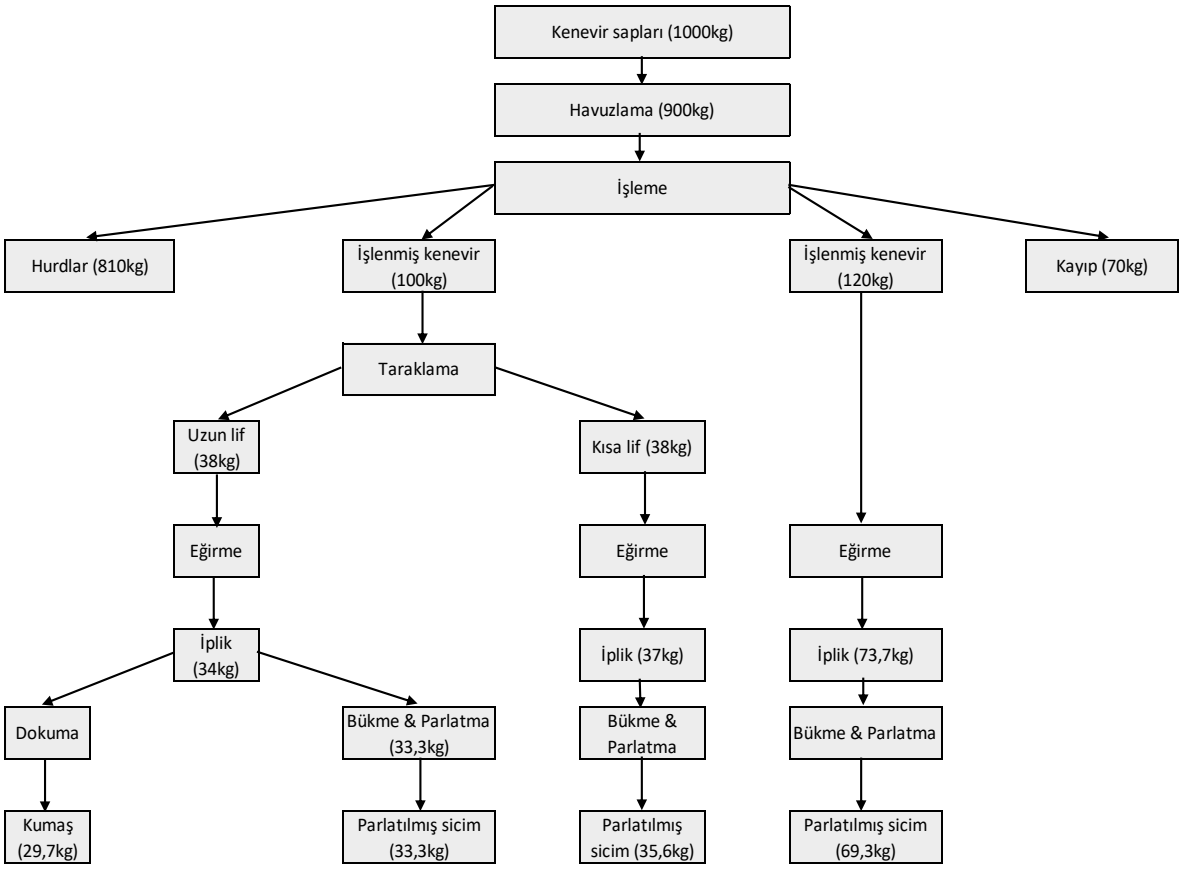
- **Enzim ile havuzlama yöntemi;** kenevirin su ile havuzlanmasında fermantasyonu kolaylaştıran bakterilerin su tanklarında bulunan enzimlerle değiştirilmesi üzerine enzimlerle ıslatılmasıdır. Buradaki amaç, su ile havuzlamada olan atık su ve kötü kokunun önüne geçmek ve su ile havuzlamaya yakın bir kalitede kenevir lifi üretimidir. Avantajı yıl boyunca bu işlemlerin yapılabilir olması iken dezavantajı kullanılan ekipmanların maliyetli olmasıdır.

3.4.4.1. <u>Elyaf çıkarma</u>

Liflerin 'hurd' olarak adlandırılan kenevir sapının odunsu çekirdeğinden tamamen ayrılarak lifler mekanik yöntemlerle çıkarılır. Havuzlama işlemlerinden sonra lifler belirli bir nem içeriğine kurutulur. Kuruma ile gövdedeki lif demetleri büzülür ve odunsu çekirdekten kısmen gevşer. Kırma ve sıyırma yöntemleri kullanılarak önemli bir miktarda yan ürün olan kısa ve uzun lif (50-60cm) ekstrakte edilir. Mekanik işlemin ilk etabında odunsu çekirdeği liften ayırmak ve gevşetmek için kırma işlemi yapılır. Sapları uzunluğu boyunca ezen ve kıran yatay veya dikey bir dizi oluklu pürüzsüz silindirlere saplar beslenir. Düz silindirik merdaneler sapları ezer ve kırar sonrasında yivli merdaneler ise odunsu çekirdekleri küçülterek ayırıp kırma ünitesine düşürür. İyi havuzlanmış kenevir saplarının mekanik yollarla lif ayırma işleminde büyük ölçüde katkısı vardır. İyi havuzlanmış ise ayırma işleminin sonunda hurd içeriği önemli oranda yaklaşık %40'ın altına düşer. Havuzlanmamış malzemelerde hurdlar yeteri kadar iyi ayrılamaz. Böylece bu çekilen elyaflar da yalnızca kâğıt imalatına uygun kullanım sunacaktır. Kenevir çekme liflerinin üretiminde kilit rol alan durumlar, lif işleme verimliliği, inceliği, renk ve lif uzunluğu gibi niteliklerdir. Mekanik işlemin ikinci etabında, önceki çürüme ve mekanik kırılma ile gevşetilip bitkinin liflerine yapışan tüm kirlilikleri temizlemek amacına sahip olan tırmıklama (taraklama) işlemidir. Bu işlem ile daha ince daha yumuşak lifler elde edilir.

Elyaf, türbin kanatlarının arasında dövülür, kavisli bir plakaya karşı kanatlı tekerlekler arasında dövülerek kesilir. Kırılmış lifler farklı yönlerde dönen bir çift türbin arasından sürekli bir kayış ile tutulur. Türbinler iki çift halinde çalışır. İlk türbinden geçen lifler ikinci türbinde ters çevrilir. Bu işlem ile ilk türbinden geçenler uzun liflerdir ancak bazı lifler kırılabilir ve bunlar kazıma atıklarının içinde tutulur. Bu atıklar tekstil ürünlerinde, kalın ipliklerde veya halatlarda kullanılmak üzere temizlenir (Horne, 2020).

Kenevir sapından lif ve kumaş elde etmek için Şekil 3.15'teki adımlar takip edilmektedir.



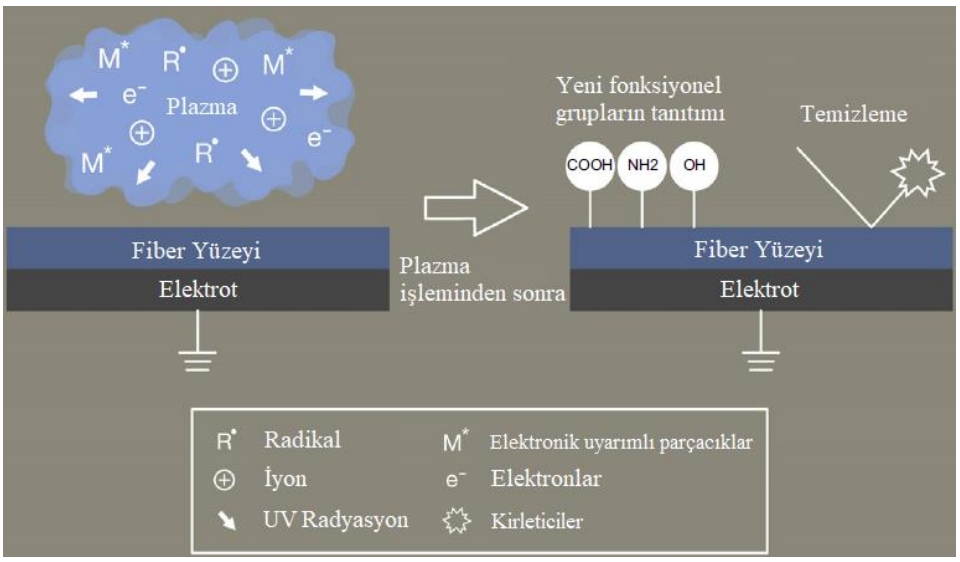
Şekil 3.15. Uzun lifli kenevir üretim akış şeması ve ortalama verimler (Horne, 2020).

3.4.5. Kenevir liflerinin yüzey geliştirme yöntemleri

Kenevir liflerinin de yer aldığı grup olan doğal liflerin yüzey geliştirme işlemleri mevcuttur ve yaygın olarak kullanılırlar. Bu yöntemler ile polimerlerle uyumsuz özellikler gösteren doğal liflerin daha uyumlu hale getirilmesi amaçlanır. Polimer ile uyumlu hale getirilmesi dışında lifler alev geciktirici çözeltilere daldırılarak alev geciktirici özellikleri de geliştirilebilir. Aşağıda liflerin fiziksel ve kimyasal yüzey geliştirme işlemlerine adım adım değinilmiştir.

3.4.5.1. <u>Fiziksel yüzey geliştirme yöntemleri</u>

- **Plazma ile yüzey geliştirme yöntemi;** günümüzdeki en yaygın fiziksel yüzey geliştirme metotları arasındadır. İki farklı plazma türü vardır. Bunlar termal ve termal olmayanlardır. Termal plazma yöntemi lif içerikli malzemelerin yüzey geliştirme yönteminde yıkıcı özellikler gösterdiği için termal olmayan plazma yöntemi kullanılır. Şekil 3.16' da şematik gösterimi yapılmış plazma işlemi; ıslanabilirlik, boyanabilirlik, yanıcılık gibi yüzey özelliklerini etkileyen yüzey kirleticilerinin giderilmesi için uygulanır. Polimerle ve lifler arasındaki yapışma özelliklerine lif yüzeyinde yapılan işlemlerle pürüzlülük kazandırıp daha iyi tutunmalarını sağlar. Plazma, oksijen veya diğer gazlarla reaksiyon verebilen radikaller üretebilir ve farklı hidrofilik / Hidrofobik yüzeyler oluşmasına sebep olabilir.



Şekil 3.16. Plazma yüzey işleme yönteminin genel şematik gösterimi (Ferreira, 2019).

- **Ultrason ve ultraviyole yüzey geliştirme yöntemi;** plazma ile yüzey geliştirme yöntemi kadar kullanılan bir yöntem değildir ancak sürfaktanlar kullanılmadan faklı maddelerin kirleticilerinin yüzeyden çıkarılmasında etkili bir yöntemdir. Ultrasonik işlem ile pamuk gibi doğal selülozik bir lif üzerinde kapsamlı denemeler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak pamuğun kristal morfolojisinde, lif ve kumaşın mekanik ve kimyasal özelliklerinde değişimler gözlenmiştir (Ferreira, 2019).

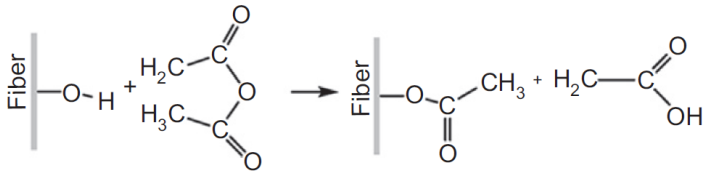
3.4.5.2. Kimyasal yüzey geliştirme yöntemleri

Doğal liflerin kimyasal yüzey geliştirme metotları; alkalizasyon, silanizasyon, asetilasyon, benzoilasyon, akrilasyon ve aktolinitril aşılaması, maleatlandırma kaplin ile işleme olarak söylenebilir.

- **Alkalizasyon;** bir diğer adıyla merserizasyon denilen yöntem doğal liflerin kimyasal işleme tabi tutulan en eski ve yaygın yöntemdir (Ferreira, 2019). Lignoselülozik liflerin polimerlerle olan etkileşimini iyileştirmek için birçok kimyasal yüzey işleme yöntemleri denenmiştir. Alkalizasyon için uygun maliyet ve bulunabilirlik açısından en çok tercih edilen Sodyum Hidroksit (NaOH) olmuştur. Alkalizasyon ile lifin hücre duvarlarını kaplayan lignin, balmumu, pektin, mumsu maddeler ve doğal yağların giderimi sağlanır. Farklı NaOH konsantrasyonlarıyla çekme, eğilme mukavemeti kazandırmış ve termal kararlılık için de olumlu yönde etkileri belirlenmiştir (Oushabi vd., 2017).

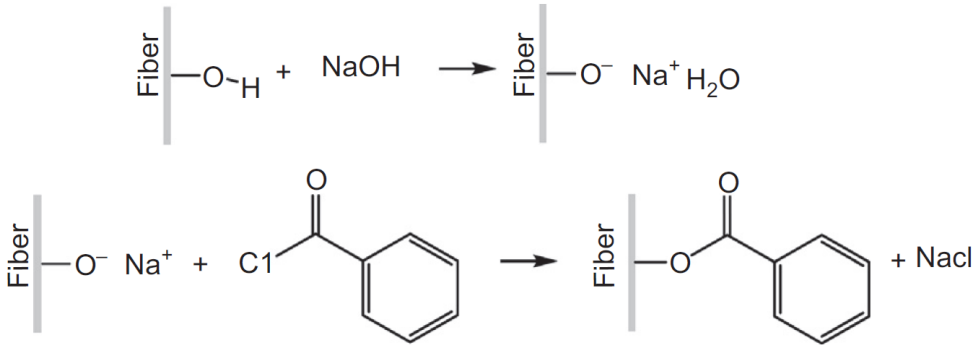
- **Silanizasyon;** silanlar, doğal lifler ile polimerik malzemeler arasındaki uyumsuzluğu gidererek birbirlerine daha iyi bir yapışma sağlamak için kullanılan umut verici ve çok yönlü bir birleştirme ajanı olarak kullanılır (Ferreira, 2019). Silanların reaktif olmayan alkil grubu, benzer polariteleri ile polar olmayan matrislerle daha uyumlu hale getirilebilir, bunun yanı sıra, reaktif organofonksiyonellik, polimer matrislerle fiziksel açıdan uyumlu olmalarıyla beraber kovalent olarak bağlanabilir. Silanların bu organofonksiyonellikleri temel olarak amino, merkapto, glisidoksi, vinil veya metakriloksi gruplarıdır. En çok kullanılmış silanlar ve polimer matris uygulamaları Çizelge 3.6'da gösterilmiştir (Xie vd., 2010).

- **Asetilasyon;** bir organik bileşiğe asetil fonksiyonel grubu (CH3COO-) katan reaksiyonu anlatır. Doğal liflerin asetilasyonuyla lignoselülozik liflerin plastikleşmesine olanak veren iyi bilinen bir esterleştirme yöntemidir. Esterleşme, asetil gruplarının (CH3CO-) Şekil 3.17' de gösterildiği üzere lifler üzerinde bulunan hidroksil (-OH) gruplarıyla reaksiyona girmesiyle gerçekleşir (Ferreira, 2019). Asetik anhidrit (CH3-C (= O) -O-C (= O) -CH3) ile kimyasal yüzey modifikasyonu, fiberlerin hücre duvarında bulunan polimer hidroksil gruplarını asetil gruplarıyla yer değiştirerek polimerlerin özelliklerini hidrofobik hale getirecek şekilde değiştirir. Asetilasyon ile doğal liflerin higroskopik özellikleri azaltılabilir ve liflerin kompozi içerisindeki boyutsal kararlılığı artırılır (Li vd., 2007).



Şekil 3.17. Asetik anhidritin fonksiyonel doğal lif gruplarıyla reaksiyonu (Ferreira, 2019).

- **Benzoilasyon;** asetilasyon işleminde olduğu gibi liflerin hidrofobik özelliklerini azaltır. Fiber ile polimer arasında olumlu yöndeki gelişmelere liflerin termal stabilitesi ve kompozit malzemesinin mukavemeti söylenebilir. Alkali muamele ile ilk mumaelede liflerdeki hidroksil grupları ortaya çıkarılır ve ikinci muamelede benzoil klorür ile liflerdeki hidroksil grupları reksiyona girerek istenilen özellik elde edilebilir. Bu reaksiyonlar Şekil 3.18' de gösterilmiştir (Ferreira, 2019).



Şekil 3.18. Alkali muamele reaksiyonu ve sonrasında fiberlerin benzoil klorür ile arasındaki reaksiyon (Ferreira, 2019).

Çizelge 3.6. Doğal lif / polimer kompozitler için kullanılan silanlar; kimyasal yapıları; organo işlevsellikleri ve hedef polimer matrisler (Xie vd., 2010).

Yapı	İşlevsellik	Kısaltma	Hedef matris
$(RO)_3Si-(CH_2)_3-NH_2$ [a]	Amino	APS	Epoksi
			Polietilen
			Bütil kauçuk
			Poliakrilat
			PVC
$(RO)_3Si-CH=CH_2$	Vinil	VTS	Polietilen
			Polipropilen
			Poliakrilat
$(RO)_3Si-(CH_2)_3-OOC(CH_3)C=CH_2$	Metakril	MPS	Polietilen
			Polyester
$(RO)_3Si-(CH_2)_3-SH$	Merkapto	MRPS	Doğal kauçuk
			PVC
$(RO)_3Si-(CH_2)_3-O-CH_2CHCH_2O$	Glisidoksi	GPS	Epoksi
			Bütil kauçuk
			Polisülfit
$R_2-Si-Cl_2$	Klorine	DCS	Polietilen
			PVC
Vinil TriMetoksi Silan Hazırlanmış Plastikler	Vinil	VSPP	Polipropilen
		VSPE	Polietilen
$(RO)_3-Si-R''-N_3$ [b]	Azid	ATS	Polipropilen
			Polietilen
			Polistiren
$(RO)_3Si-(CH_2)_{15}CH_3$	Alkil	HDS	Polietilen
			Doğal kauçuk
[a.] R = Etil veya metil			
[b.] R'' = -C6H4-SO2-			

3.5. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemelerin dünya çapında kesin bir tanımı yoktur. Ancak kompozit malzemelerin en az iki farklı fazdan yani takviye ve matris fazından oluştuğunu söylemek doğru olacaktır. Kompozit malzemeler iki ya da daha fazla malzemenin bir araya getirilerek istenilen özellikleri kazandırabilmek adına yapılan malzemelerdir. Bir kompozit malzeme sentezinde takviye fazlar süreli faz olan matris fazı içinde dağıtılır. Tek koşul, takviye fazında kullanılan malzemenin işlem sırasında veya yeniden işlenmesi durumda kimliğini korumasıdır. Kompozitlerin özellikleri, bileşen malzeme özelliklerinin göreli oranlarının ve takviye fazının geometrisi, dağılım ve yöneliminin bir fonksiyonudur.

Çok farklı özelliklerde çeşitli kompozit sentezleri mevcuttur. Ana etkenler bileşenlerin özellikleri ve nispi miktarlarıdır. Uygun oranlarda doğru malzeme kombinasyonu son malzeme için aranan özelliklerin verilmesinde büyük önem arz etmektedir (Balasubramanian, 2013).

3.5.1. Matris malzemeleri

3.5.1.1. Polimerik matris malzemeleri

Kompozitlerde en yaygın matris malzemesi polimerik matrislerdir. Polimerik matrisler olumlu ve olumsuz özellikleriyle iki yönde ele alınabilir. Olumsuz yönden baktığımızda seramik matris ve metal matrislere kıyasla mukavemetleri ve sertlikleri düşüktür. Olumlu yönden bakıldığında ise polimer matrisli kompozitler (PMC) yüksek basınç ve yüksek sıcaklık gerektirmez. Bu durumda diğer matrislerde olduğu gibi takviyenin bozunma tehlikesinin polimer matrisli kompozit üretiminde daha az olduğu söylenebilir (F.L.Matthews, 1999). Sürekli elyaf takviyesi ile PMC'lere izotropi adında yönlü bir karakter kazandırılır. PMC'ler matris lif yönüne paralel (0˚, eksenel ve boyuna yön) olarak sentezlendiğinde en güçlü, liflere dik olarak sentezlendiğinde ise (90˚, enine yön) en zayıf özellikleri sergiler. Takviye için sürekli, süreksiz ve parçacık lifler kullanılır. Süreksiz ve parçacık lifler takviye olarak kullanıldığında matris içerisinde rastgele yönlenme eğiliminde daha izotropik olurlar. Bu tür PMC'ler sürekli fiberlere kıyasla daha düşük mukavemetlere sahiptir. Ancak; ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama ve basınç ile kalıplama gibi takviye malzemesi içermeyen plastikler için geliştirilmiş teknolojiler kullanılarak daha ucuza üretilebilir (Anonim, 1988a). Polimer matrislerin basit bir sınıflandırması olarak; termosetler, termoplastikler ve kauçuklar söylenir. Termoset ve termoplastik kompozitler için Çizelge 3.7' de bazı karşılaştırmalı özellikler sunulmuştur. Yeni bir çalışma için bütün detayları değil temel olarak ele alınan karşılaştırmaları sunmaktadır (F.L.Matthews, 1999).

Çizelge 3.7. Termoset ve termoplastik polimer kompozitlerinin bazı özelliklerinin karşılaştırması (Ngo, 2020).

	TERMOSET	**TERMOPLASTİK**
Proses	Geri dönüşümü olmayan güçlü kimyasal bağlar oluşturmak için, kürleme ajanlarıyla birbirlerine çapraz bağlanan monomerlerden oluşur. Çapraz bağlama yapılmasının amacı ısı uygulandığında ürünün erimesine engel olmaktır. Bu termosetleri elektronik cihazlar gibi alanlarda daha ideal bir uygulama haline getirir.	Peletler ısıtıldığında yumuşak bir hal alır ve daha da ısıtıldıkça akışkan bir faza dönüşür. Bu özellikle birlikte termoplastik malzemeler fiziksel özelliklerinden ödün vermeden yeniden kalıplanabilir ve geri dönüştürülebilirdir.
Özellikler ve faydalar	İstenilen özelliklerde bir kompozit sentezinde kullanılmak üzere çok çeşitli termoset reçineler vardır.	İstenilen özelliklerde bir kompozit sentezinde kullanılmak üzere çok çeşitli termoset reçineler vardır.
	Kimyasallara karşı direnç, ısı direncini ve yapıdaki sağlamlığın sağlanması ile mekanik özellikleri artılar kazandırır. Deformasyonlara karşı dirençli oluşundan ötürü sızdırmaz ürünlerde sık kullanılır.	Genel olarak yüksek mukavemet, çekme direnci ve kolay bükülebilirlik sunar. Polimerlere bağlı olarak, plastik torbalar veya yüksek gerilimli mekanik parçalar gibi düşük gerilimli uygulamalarda fayda sağlayabilir.
	Geri dönüştürülemez.	Yüksek oranda geri dönüştürülebilir.
	Yeniden kalıplanamaz veya yeniden şekillendirilemez (ısınırsa eritilemez).	Isıtıldığında eriyebilir, yeniden kalıplama / yeniden şekillendirme yeteneklerine sahiptir.
	Güçlendirici lifleri ve dolgu maddelerini ıslatmak kolaydır.	Güçlendirici lifleri ve dolgu maddelerini ıslatmak daha zor.
	Termoplastiklere göre yüksek sıcaklıklara daha dayanıklıdır.	Yüksek darbe direnci.
	Kalın ve ince duvar özellikleri.	Kimyasallara dayanıklı.
	Mükemmel estetik görünüm.	Sert kristal veya lastik yüzey seçenekleri.
	Yüksek düzeyde boyutsal kararlılık.	Estetik açıdan üstün yüzeyler.
	Yüzey kaplaması daha zor.	Çevre dostu üretim.
	Maliyet-etkili.	Genellikle termosetten daha pahalıdır.

Termoset kompozit matrisler, polyester, vinil ester, epoksiler, bismaleimidler, siyanat esterler, poliimidler ve fenolik matrisleri içerir. En çok kullanılan matris ise epoksi reçinelerdir. Düşük ve orta derece sıcaklıklarda (135°C' ye kadar) kullanılır.

Çok yüksek sıcaklık (287,7-315,5℃ sıcaklıklarına kadar) uygulamarında ise poliimidler kullanılır. Fenolik reçineler üst düzeydeki duman ve yangın direnci sunması sebebiyle sık olarak uçak iç bileşenlerinde kullanılan yüksek sıcaklık sistemleridir (F.C.Campbell, 2004).

3.5.1.2. Seramik matris malzemeleri

Seramik matris kompozitler (CMC), genellikle matris içerisinde bulunan seramik elyaflar veya ince elyaflardan oluşur. Monolitik seramiklerin kırılganlıklarının üstesinden gelmek amacıyla seramik matrisli kompozitler tasarlanmıştır. Ters kompozit olarak adlandırılırlar. Çünkü matris fazı yani seramik matrisin kırılma gerilmesi matris içerisinde takviye olarak kullanılan fiberlerin kopma gerilmesinden daha düşüktür. Polimer matris kompozitler ve metal matris kompozitlerde bu durum tam aksi haldedir. CMC'lerde matris bir yük altında başarılı bir mukavemet gösteremez. Matriste oluşan mikro çatlaklar ile kırılgan liflerin erken bozulmasını önlemek amacıyla işleme aşamasında fiber (F) / matris (M) bağlanması kontrol edilmelidir. CMC'ler ile yüksek dayanıklı malzemeler üretilebilir. Buradaki en önemli aşama ise interfaz denilen matris ile fiber arasındaki arayüzeyin geliştirilmesini kapsayan liflerin kaplanmasını içerir. CMC'ler yük altındaki yüksek sıcaklıklar, yanma gazları ve aşındırıcı atmosfer gibi ağır endüstrilerde termoyapısal malzeme olarak tasarlanıp kullanılır. En yaygın CMC'ler ise, karbon/karbon (C/C), karbon/silikon karbür (C/SiC) ve silikon karbür/silikon karbür (SiC/SiC)' dür (Naslain ve Pomeroy, 2016).

3.5.1.3. Metal matris malzemeleri

Metal matris kompozitler (MMC), çok geniş kapsamlı olmasa da uçak, helikopter ve uzay araçlarında hafif yapısal elemanların üretiminde kullanılan malzemelerdir. MMC malzemeleri matris fazına gömülen sert takviye parçalarından oluşur. Bu sert takviye parçalarına örnek olarak düşük yoğunluk özelliği gösteren alüminyum (Al), magnezyum (Mg) veya titanyum (Ti) gösterilebilir. Nikel (Ni) süper alaşımları, yüksek sıcaklık uygulamalarında MMC'lerde matris faz olarak kullanılabilir. Metal matris fazı, sürekli lifler, ince lifler veya parçacıklar ile seramik veya metal oksit kullanılarak güçlendirilir. Bor, karbon ve silisyum karbür genel olarak sürekli takviye malzemesi olarak kullanılır ve bu takviye parçaları matris içerisinde dağıtılır. Silisyum karbür (SiC), alümina (Al_2O_3) ve bor karbür (B_4C) en yaygın parçacık takviye malzemeleridir.

Ortalama olarak %30'un üzerindeki bir takviye malzemesinde, yüksek sertlik ve düşük süneklik sebebiyle MMC'lerin işlenmesi ve geliştirilmesi, şekillendirilmesindeki zorluklar sebebiyle çok sık kullanılmaz (Mouritz, 2012).

3.5.2. Fiber takviyeleri

Fiber, bir kompozit malzeme sentezinde istenilen son ürünün özellikleri doğrultusunda seçilmiş ve kompozitin en önemli ikinci bileşenidir. Fiberlerin temel özellikleri için yüksek mukavemet, sertlik ve üzerine düşen yükün bir kısmını taşımak olarak söyleyebiliriz. Fiberler geçmişten beri farklı sektörlerde kullanım bulmuştur. Günümüzde sentetik fiberlerin tükenmekte olduğu ve yerine oldukça avantajlar sunabilecek ve geliştirilebilecek doğal fiberlerin kullanımı yaygınlaştırılmaya çalışılıyor. Sentetik fiberlerin en başta gelenleri cam, karbon ve aramid (kevlar) fiberlerdir (Sapuan, 2017). Polimer kompozit malzemelerinde takviye olarak kullanılan ve mükemmel sonuçlar veren doğal fiberlere ise; bambu, muz, jüt, jowar, keten, sisal ve kenevir fiberleri söylenebilir (Kerni vd., 2020).

3.5.2.1. <u>Sentetik fiber takviyeleri</u>

- **Cam fiber,** yapısal ürün gamında polimer kompozitlerde %90 oranında en yaygın kullanılan fiberdir. Karbon ve aramid yani bir diğer adıyla kevlar fiberlere kıyasla daha ucuzdur. Piyasadaki camların büyük bir kısmını silika, SiO_2 oluşturur. Cam fiberler, camın erimiş halde bir delikten çekilmesiyle elde edilirler ve yaklaşık 200 filament iplik oluşur (Sapuan, 2017). Cam fiberler kendi içinde birkaç farklı sınıfa ayrılır. E-cam ("elektrik" için E); sürekli filament ve rastgele yönelimli fiber matlar halinde bulunan çok amaçlı fiberdir ve cam fiberler gruplarından en çok kullanılan fiber E-camdır. C-cam ("kimyasal" için C); kimyasallara karşı dirençleri yüksek olan fiberlerdir. Amaç fiber üretimi değil yumuşak doku yapmaktır. A-cam ("alkali" için A); günlük yaşantımızdan da bildiğimiz tipik bir camdır ve orijinal cam fiber türüdür. Alkali içeriği yüksektir. S-cam; en yüksek mukavemet ve sertlik bu cam türündedir. Havacılık ve savunma sanayii endüstrilerinde kullanım bulmaktadır (Murphy, 1994).

- **Aramid (Kevlar) fiber,** yüksek termal özellikler sergileyen bir elyaftır. Elyaf içeriğindeki moleküllerin eksenel olarak dizilişleri bu fiberi mukavemet açısından güçlü kılmaktadır. Aşınmaya ve organik çözücülere karşı yüksek direnç, iletken

olmaması, yüksek bozunma sıcaklığı (50°C'den başlamak üzere), düşük yanma riski ve yüksek sıcaklıklarda aramid kumaşın bütünlüğünü koruması gibi dikkat çekici özellikleri vardır. Bu özellikler, havacılık ve savunma sanayinde dikkat çekmiş, uçak gövde parçalarında, balistik aksesuarlarda, zırhlarda, tekne gövdelerinde, otomobil parçalarında ve ısıya dayanıklı kask ve giysilerin üretimlerine kadar kullanım sağlamıştır (Rahman ve Putra, 2018).

- **Karbon fiber;** bu fiber türü farklı bir fiber olan grafit fiber ile aynı isimlendirmeye sahiptir. Karbon fiber mukavemeti grafit fibere göre daha yüksektir lakin kompozit malzemelerde aynı malzeme olarak adlandırılır. Karbon fiberler havacılık endüstrisinde, otomotivde, denizcilik gibi sektörlerde uygulama bulmaktadır. Yüksek çekme mukavemeti ve modülü, yüksek yorulma direnci ve yüksek termal iletkenliğe sahiptir. Karbon fiber cam ve aramid fiberlere kıyasla daha yüksek mukavemet özellikleri gösterir (Sapuan, 2017).

3.5.2.2. Doğal fiber takviyeleri

Doğal lifler birkaç alt türe ayrılır. Bunlar;

a. Kamış lifleri; buğday, mısır ve pirinç,
b. Yaprak lifleri; sisal ve ananas yaprak lifleri,
c. Bast lifleri; kompozit malzemelerde bizim tercihimiz olan ve Bölüm 3.4' de de detaylandırılan kenevir bu lif grubundadır. Kenevir lifinden başka ise; jüt, keten, rami ve kenaf sak lifleri de bu gruptadır,
d. Tohum lifleri; Hindistan cevizi, pamuk ve kapok,
e. Özlü lifler; Kenevir, kenaf, jüt,
f. Diğer bütün lifler; ağaçlar ve onların köklerini kapsayan türler (Kerni vd., 2020).

3.6. Kompozit Malzemelerinin Üretim Metotları

Kompozit malzemelerinin üretilecek boyut ve özelliklerine göre farklı üretim teknikleri vardır. Bunlar; elle yatırma, vakum torbalama, vakum infüzyon, pultrüzyon, basınç ile kalıplama, püskürtme, otoklav ve filament sarma yöntemleridir.

3.6.1. Elle yatırma yöntemi ile kompozit malzeme üretimi

Elle yatırma yönteminde genellikle dokuma kumaşlar kullanılır ayrıca lifler de kullanılır. Kumaş veya lifler kalıba manuel olarak yerleştirilir ve rulo veya fırçalarla reçine ve sertleştirici karışımı hava kabarcıkları olmayacak şekilde uygulanır. Sadece viskozitesi düşük reçineler kullanılır. Bu reçineler ısıtılabilir. Oda sıcaklığında kürleme gerçekleştirilir. Çok ucuz bir yöntem olan elle yatırma metodunda çok çeşitli elyaflar ve malzemeler üretmek mümkündür ve tek seferlik işlerde daha avantajlıdır. Dezavantajı ise üretim sırasında üretim operatörünün el becerisi çok önemlidir. Yüksek lif hacmindeki kompozitllerin üretimi zordur. Rüzgar türbinlerinin kanatları, tekneler ve mimari pervazlar gibi üretim alanlarında kullanılabilir (MF vd., 2012). Elle yatırma yöntemine ait üretim prosesi Şekil 3.19' da gösterilmiştir (Sapuan, 2017).

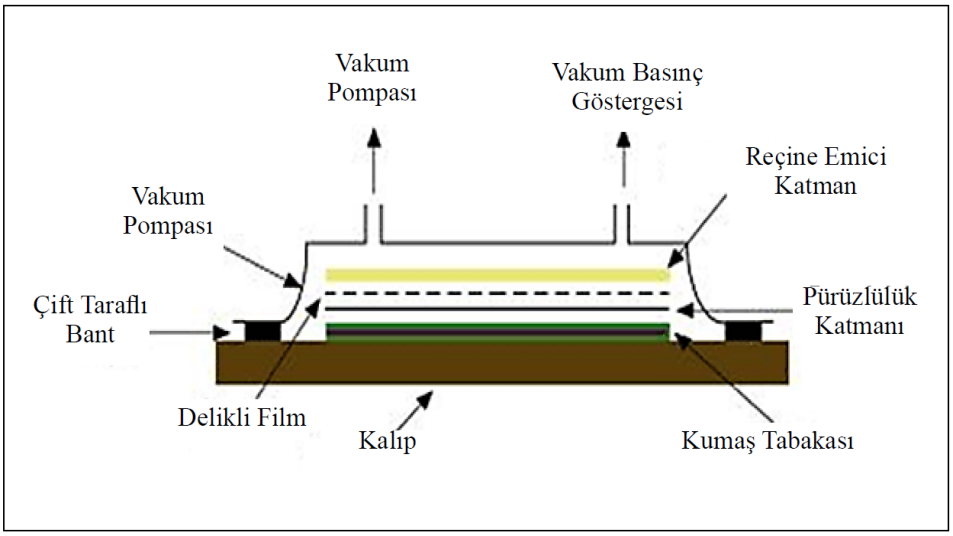


Şekil 3.19. Elle yatırma yöntemi ile kompozit üretim metodu (Sapuan, 2017).

3.6.2. Vakum torbalama ile kompozit malzeme üretimi

Genel itibariyle ıslak elle yatırma yöntemine benzerlik gösterir. Kalıp içerisine lifler yerleştirilip reçine ve sertleştirici karışımı uygulanır. Daha sonra elle yatırma yönteminde kullanılan rulo veya fırçaların yerini negatif basınç yani vakum etkisiyle hava kabarcıklarını tamamen almaya çalışarak malzeme güçlendirilmeye çalışılır ve üretim gerçekleştirilir.

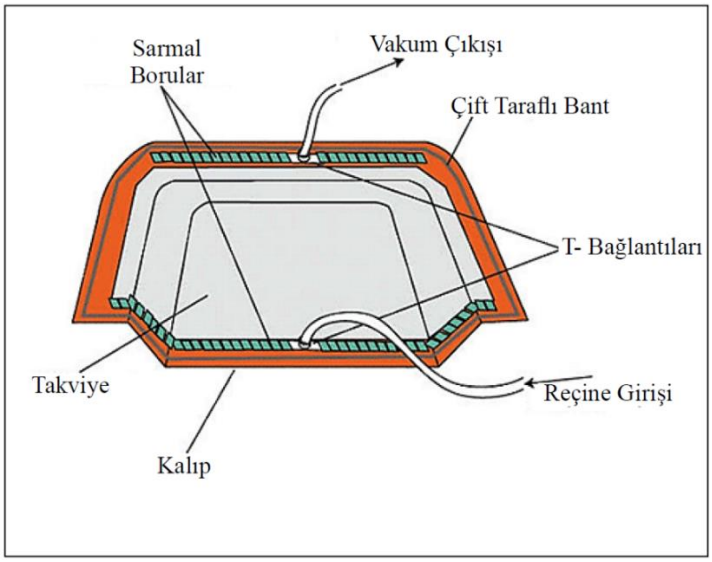
Üretim prosesinin şematik gösterimi Şekil 3.20’ de verilmiştir (Durgun vd., 2014). Elle yatırma yönteminde yüksek hacim oranlı kompozit üretimi zorluklar oluştururken bu yöntemde yüksek lif hacminde malzemeler üretmek mümkündür. Proses kontrolü daha iyidir. Dezavantajları arasında maliyetli bir yöntem olması ve yine üretim aşamasındaki operatörün becerisi gerekmektedir. Uygulama alanlarından bazıları; büyük tekne gövdeleri, uçak yapıları, yarış arabalarının bileşenleri ve yerinde tadilat yapılabilecek malzemelerde kullanılır (MF vd., 2012).



Şekil 3.20. Vakum torbalama ile kompozit üretiminin şematik gösterimi (Durgun vd., 2014).

3.6.3. Vakum infüzyon ile kompozit malzeme üretimi

Vakum torbalama yönteminde lifleri ve reçineyi elle kalıba yerleştirdikten sonra negatif basınç ile reçinenin tüm elyaf katmanlarına nüfuz etmesini sağlarken vakum infüzyon yönteminde kalıba yerleştirilen elyaflara reçine ve sertleştirici karışımı bir reçine kabından, genel prosese negatif basınç uygulanarak reçine çektirilir. Vakum infüzyon yöntemine ait üretimin şematik gösterimi Şekil 3.21’ de verilmiştir (Durgun vd., 2014).



Şekil 3.21. Vakum infüzyon ile kompozit üretiminin şematik gösterimi (Durgun vd., 2014).

3.6.4. Pultrüzyon ile kompozit malzeme üretimi

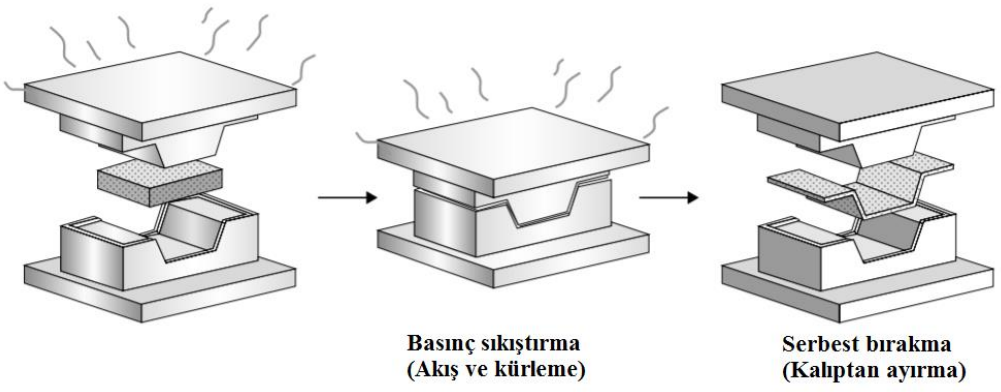
Pultrüzyon kelimesinin anlamı "çekme" ile "ekstrüzyon" kelimelerinin birleşiminden türemiştir. Pultürzyon ile kompozit üretimi liflerin bir paletli çekme sisteminde elyaf fitili ya da kumaş matları şeklinde üretilmesini içerir. Lifleri ıslatmak için bir reçine banyosuna lifler daldırılır ve çıkarken de istenilen formdaki bir kalıba yerleştirilerek şekillendirme işlemi ile üretim sonlanır. İstenilen uzunluklara göre elde edilen ürün kesilir. Pultrüzyon ile üretim işlemi, I kirişler, T kirişler, kanal yapılar ve ince duvarlı borular gibi katı veya içi boş çeşitli uzunluklara sahip sabit kesit şekillerindeki sürekli kompozit profillerinin üretiminde kullanılır. Bu üretim prosesinde normalde polyester ve epoksi gibi ısı ile kürleşme sağlanan matrisler kullanılır. Lif olarak ise cam, aramid, karbon ve çeşitli doğal lifler kullanılabilir. Sürekli fitiller, dokuma kumaşlar veya elyaf matlar bir çözgü sehpasına yerleştirilir ve çekme işlemi uygulanarak reçine banyosunda emprenye edilir veyahut bir rulo yardımıyla reçine ile işleme gerçekleştirilir. Pultüzyon ile kompozit üretimine ait üretim aşamasının temel görseli Şekil 3.22' de gösterilmiştir (Sapuan, 2017).



Şekil 3.22. Pultrüzyon işleminde reçine banyosunda polimer emdirilmiş sürekli lifler (Sapuan, 2017).

3.6.5. Hidrolik ve mekanik pres yöntemi ile kompozit malzeme üretimi

Hidrolik veya mekanik pres kalıplama yönteminde pres makinesinin üst ve alt tabakaları ısıtılır. İstenilen fiziksel görünüm için kalıplar arasına takviye malzemesi yerleştirilerek basınç ve sıcaklık ile üretim aşaması gerçekleştirilir. Kısa çevrim süresi, üretim kapasitesinin yüksek olması ve boyutsal kararlılık açısından sunduğu avantajlardan ötürü otomobil endüstrisinde çeşitli uygulama alanları bulur (Rajak vd., 2019). Sıkıştırma kalıplama ile kompozit üretiminin şematik gösterimi Şekil 3.23' de verilmiştir (Park ve Lee, 2012).



Şekil 3.23. Sıkıştırma kalıplama ile kompozit üretiminin şematik gösterimi (Park ve Lee, 2012).

3.7. Yapı Malzemelerine Yapılan Analizler

Bu başlıkta kullanılan test ekipmanlarının amacı, tanımları ve elde edilen verilerin hesaplanmasına yönelik formüller ve örnek hesaplamalar verilmiştir.

3.7.1. Ses yutum katsayısı

Ses yutum katsayısının tespiti için 29mm çapında 30mm kalınlığında bir kompozit malzeme hazırlanmış ve 29mm çapındaki bir empedans tüpü ile bu malzemenin ses yutum katsayısı hesaplanmıştır.

- Ses yutum ya da ses absorpsiyon katsayısının belirlenmesinde kullanılan empedans tüpü; ses yutum katsayısının ölçümünü yaparken partikül hız sensörü empedans tüpü ile hazırlanan kompozit numunesi arasındaki mesafenin değişimini en az miktarda farklılık olacak şekilde numuneye olabildiğince ortogonal olarak hedeflenir. Numune ve empedans tüpü düzgünce yerleştirildikten sonra test başlatılır. Test esnasında hoparlör geniş bir banttan gürültü yayar ve partikül hız sensörü basıncı ve ayrıca hız sinyallerini okur. Okunan bilgiler bilgisayar ortamında kullanılan bir uygulama üzerinde otomatik hesaplanır ve ses yutum katsayısı frekanslara bağlı olarak uygulama üzerinden sunulur. Uygulamanın yaptığı hesaplamada ses yutum katsayısı 1/3 oktav bantlarında sonuç olarak verilmiştir (Pedrero vd., 2020). Empedans tüpü ile ses yutum katsayısının ölçümü ile ilgili test düzeneği ve kompozit malzeme numunesi Şekil 3.24-Şekil 3.26'de verilmiştir.

- **Ses yutum katsayısı** parametresi, malzeme tarafından (kenevir lif takviyeli epoksi kompozit) emilen ses enerjisi olarak tanımlanır. Ses yutuma katsayısının sembolü α olarak gösterilir. α ise 0 ile 1 arasında değişen değerler alır. Değer 0 olduğu zaman, malzeme gelen enerjiyi absorbe etmez, 1 olduğunda ise ses enerjisini daha iyi absorbe eder (Fernea vd., 2019). Ses yutum katsayısı için hazırlanan 29mm çapında ve 30mm kalınlığındaki silindirik kenevir takviyeli epoksi kompozit malzemenin görüntüleri Şekil 3.26'da verilmiştir. Ses yutum katsayısı genel olarak, malzemenin üzerine gönderilen ses dalgalarının açısının bir fonksiyonudur. (Vidinlimen, 2010).

- Ses yutum katsayısının belirlenmesinde kullanılan empedans tüpünün çapı ve kullanılan mikrofonlar arası mesafenin sırasıyla amacı; üst frekans limitini ve düşük frekans limitini belirlemektir. Empedans tüpü ile ses yutum katsayısının (α) belirlenmesinde Denklem (3.1) kullanılır.

$$\alpha = \frac{I_{abs}}{I_{inc}} \tag{3.1}$$

Burada;
α ses yutum katsayısı,
I_{abs} Yutulan ses enerjisi (J)
I_{inc} Toplam gelen ses enerjisi (j)
şeklinde ifade edilmektedir (Vidinlimen, 2010).



Şekil 3.24. Empedans tüpü ile ses yutum katsayısı ölçüm ekipmanları.



Şekil 3.25. Empedans tüpü ile ses yutum katsayısının 29mm çapındaki ölçüm ekipmanı.



Şekil 3.26. Ses yutum katsayısının belirlenmesinde kullanılan kenevir lif takviyeli epoksi kompozit malzeme.

- **Oktav bantları;** insan kulağı yaklaşık 16Hz (Hertz) ile 20kHz (Kilo Hertz) arasındaki seslere tepki verebilir. Bu frekans aralığı farklı kaynaklarda 16Hz ile 16kHz şeklinde de görülebilir. İnsan kulağının duyum hassasiyetinin en üst düzeyi ise 3kHz'dir. Normal tonlamada bir sohbet 200Hz ile 10kHz arasındadır. Daha

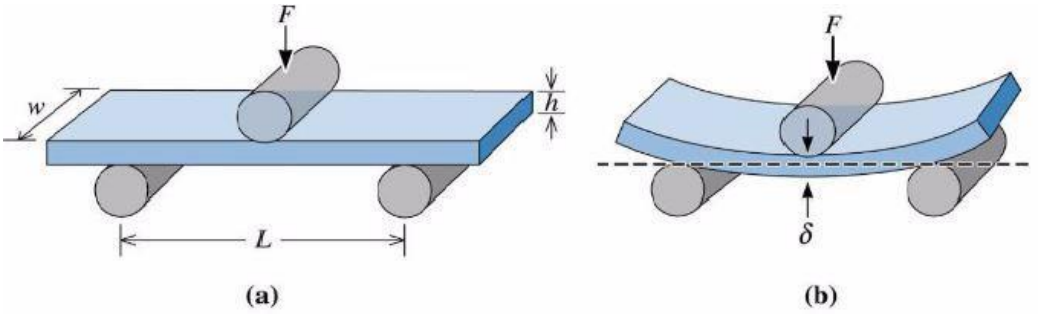
anlaşılır ve duyulur bir sohbet konuşmasının ise 1kHz ile 2,5kHz arasında olması gerekir. İncelenecek frekans aralığı çok geniş olduğunda ve bantların sabit genişlikte seçilip kullanılması analiz süresinde oldukça fazla zaman alacaktır. Bu yüzden ses analizlerinde incelenmek istenen ses frekansları oktavlara bölünerek yapılacak test süresinden kazanarak zaman kontrolü de yapılmış olur. Dar bant analizleri için genel olarak 1/3 oktav analizi yapılır ve bunun anlamı ise bir oktav aralığının üçe bölünmesidir (Vidinlimen, 2010).

3.7.2. Üç noktalı eğilme dayanımı

Kompozit malzemelerin mekanik mukavemetleri genel olarak eğilme testleri ile gerçekleştirilir. Uluslararası Standartlar Organizasyonu polimer matrisli kompozit malzemelerin mukavemet değerlerini test etmek için üç noktalı eğilme testi (3PBT) kullanılması gerektiğini belirtmektedir. Bu test ile test malzemesinin alt desteklerden eşit uzaklıkta basınç uygulaması ile bükülen ve alt yüzeylerinde oluşmaya başlayan kırılma ile daha ilişkili olan çekme gerilmelerini destekleyen uzun çubuk şeklinde kalıplardan çıkarılmış numuneler kullanılır. Test yapılandırması, silindirik destekler ve silindirik yükleme parçası arasındaki oluşan gerilim alanını sınırlandırma eğilimindedir. Dört noktalı eğilme testinde ise test cihazının üst kısmında fazladan bir adet daha silindirik yükleme parçası mevcuttur. Üç noktalı eğilme testi ile karşılaştırma yapıldığında üç noktalı eğilme testinde daha yüksek dayanımların ölçülmesi beklenmektedir. Bu yüzden daha yüksek dayanımlı malzemelerin eğilme testi için 3 noktalı eğilme testi gerçekleştirilir (Junior vd., 2008).

Eğilme mukavemet testinde 160x40x40 mm boyutunda prizma kompozit malzememiz üç noktalı eğilme test cihazına Şekil 3.28'de olduğu gibi yerleştirilip UT-5540 kodlu 200kN kapasite ile eğilme testi gerçekleştirilir. Eğilme test sonucunda bilgisayar test cihazının verileri yük ve yer değiştirmeyi mm cinsinden sunar.

Test numunesi silindirik destekler üzerine konurken yük uygulayacak silindir parçaya tam ortalanacak şekilde yerleştirilir. Bunun bir görseli Şekil 3.27'de verilmiştir (BTÜ, 2016).

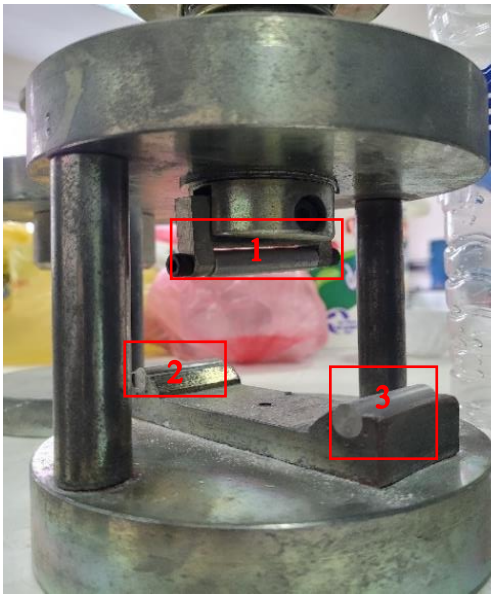


Şekil 3.27. Üç noktalı eğme deney düzeneği (BTÜ, 2016).



Şekil 3.28. Üç noktalı eğilme gerilmesi test cihazı ve cihaza yerleştirilen kompozit malzeme (test numunesi).

Eğilme test cihazlarında üç noktalı eğilme gerilme testi ile dört noktalı eğilme gerilme testleri gerçekleştirilebiliyor. Bu testlerden üç noktalı eğilme gerilmesine ait test aparatı Şekil 3.29'da gösterilmektedir.



Şekil 3.29. Üç noktalı eğilme testi için hazır test aparatı.

Test sonuçlarında çıkan yük ve yer değiştirme verilerine göre öncelikle birim şekil değiştirme Denklem (3.2)'ye göre hesaplanır (DEÜ, 2021).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \tag{3.2}$$

Burada;

- ε birim şekil değiştirme (mm/mm),
- ΔL Kuvvet uygulandığı zaman oluşan boy değişimi, yer değiştirme (mm);
- L_0 Kuvvet uygulanmadan önceki ilk boy (mm)

olarak verilmiştir.

Birim şekil değiştirme sonucundan sonra eğilme gerilmesi hesabı için Denklem (3.3) kullanılır (Junior vd., 2008).

$$\sigma = \frac{3\ Load\ (Yük)\ L}{2\ \omega\ b^2} \tag{3.3}$$

Burada;

- σ eğilme gerilmesi (N/mm^2),
- Load (Yük) numune üzerine uygulanan en fazla yük (N)
- L mesnetler arası uzaklık (mm),
- ω genişlik (mm),
- b numunenin yüksekliği (mm)

olarak verilmiştir.

3.7.3. Isı iletim katsayısı

Yüksek ısı kayıplarını engellemek için yalıtım malzemelerinin ısıyı iletmemesi gerekir. Malzemenin ısı iletim katsayısı ne kadar düşükse, malzemenin içinden o kadar az ısı geçer. Bir bina dış cephesinin ısıl performansı, yüksek oranda, asıl olarak onun λ değeri ile belirlenen yalıtım tabakasının ısıl etkinliğine bağlıdır. Termal iletkenlik, numune boyunca bir birim sıcaklık farkı tarafından indüklenen, homojen olarak sentezlenmiş malzemenin birim alanı boyunca izotermal düzlemlerine dik bir doğrultuda kararlı hal ısı akışının zaman hızıdır. Mikroskobik ölçüde, görünür termal iletkenlik, hücre boyutuna, liflerin veya parçacıkların çaplarına ve düzenine, termal radyasyona karşı şeffaflığına, gazın türüne ve basıncına, bağlayıcı malzeme vb. gibi birçok etkene bağlıdır. Makroskobik ölçülere göre ise, görünen termal iletkenlik büyük bir ölçüde ortam sıcaklığına, ne içeriğine, yoğunluğa ve yaşlanma durumu gibi etkenlere bağlıdır. Bu nedenle, termal iletkenlik katsayısı her zaman, her termal hesaplamada ölçülen ilk parametredir.

DIN 4108 “Binalarda ısı yalıtımı ve enerji ekonomisi” standartlarına göre λ değeri 0,1 W/mK’ den düşük olan malzemeler ısı yalıtım malzemeleri olarak sınıflandırılabilir. 0,03 W/mK değerinden daha düşük ısı iletim katsayısına sahip malzemeler için çok iyi ısı yalıtım özelliği sergiledikleri, 0,03 ila 0,05 W/mK değerleri arasındaki malzemeler ise orta düzeyde performans gösterirler. 0,07 W/mK değerinden yüksek ısı iletim katsayısına sahip malzemeler ise daha az performans göstermektedir (Hung Anh ve Pásztory, 2021).

3.7.4. Su emme yüzdesi

Su absorpsiyon sonuçları ASTM D 2842-01'e göre ölçülmüştür. Su emme testi 7 gün (168) saat süre ile damıtılmış suya daldırılarak gerçekleştirilmiştir. Belirli zaman aralıklarıyla kompozit malzemeler sudan çıkarılıp üzerindeki su kalıntılarını bir bez yardımıyla nemli kalacak şekilde temizlemişlerdir. Su emme yüzdesini (%W) belirlerken de aşağıda belirtilen Denklem (3.4)’ü kullanmışlardır (Sair vd., 2018).

$$W\ (\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \qquad (3.4)$$

Burada;

W (%) yüzdece su emme

m_1 kuru ağırlık

m_2 ıslak ağırlıktır.

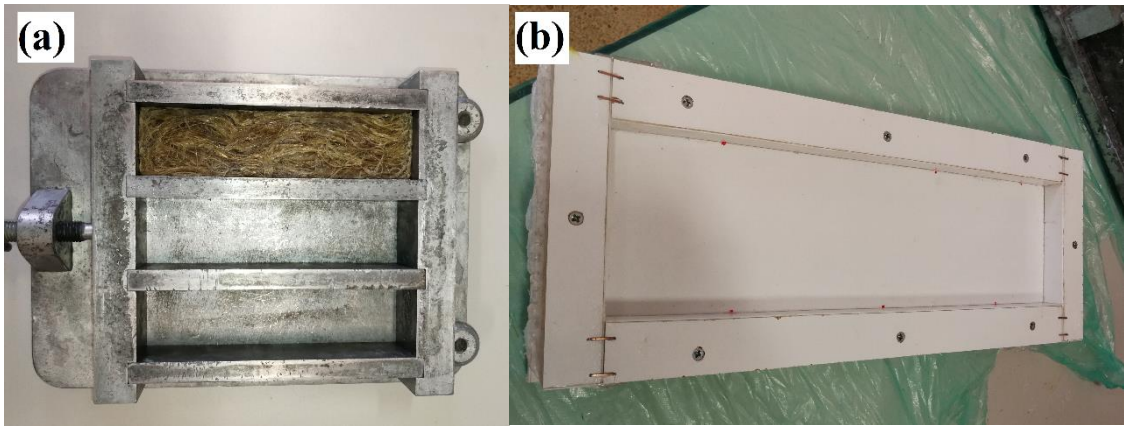
4.MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Kullanılan Kimyasallar ve Materyaller

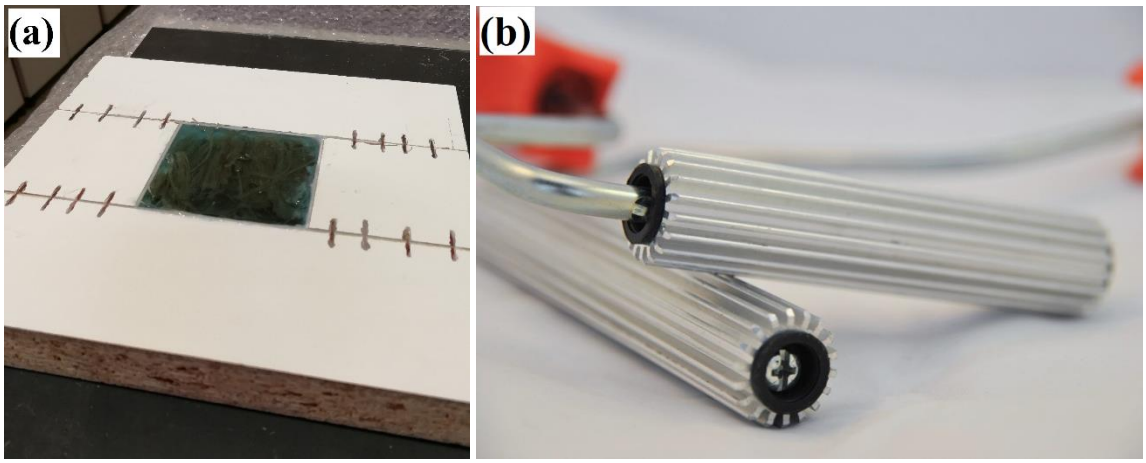
Kenevir lifinin yüzey geliştirme işlemleri için kullanılan kimyasallar ve kompozit malzemenin hazırlığında kullanılan materyaller aşağıda sunulmuştur:

Kimyasallar
İzopropil Alkol
Sodyum Hidroksit (NaOH)
Asetik Asit (CH_3COOH)
Etanol
Silan Ajanı (TEOS)
Kalıp ayırıcı Wax
Duratek DT1105 Reçine
Duratek DTS1100 Sertleştirici

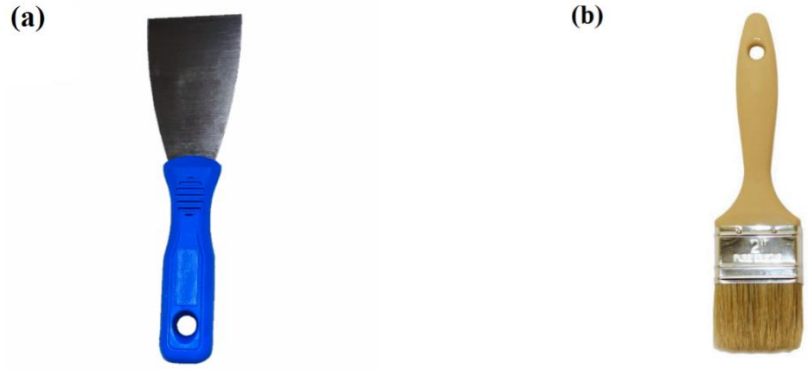
Aşağıda kompozit malzeme hazırlanırken kullanılan materyallerden çelik döküm kalıp (160x40x40 mm) Antalya Başergün Boya ve Kimya İnş. San. Tic. A.Ş ödünç alınmıştır. Tahta kalıplar ise Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Ahşap Atölyesinde resmi yazışmalar ve onay süreci sonrası istenilen boyutlarda yaptırılarak temin edilmiştir. Materyallerin her biri aşağıda görsellerde sunulmuştur.



Şekil 4.1. Kompozit malzeme sentezinde kullanılacak kalıplar
(a) Çelik döküm kalıp (boyut: 160x40x40 mm) **(b)** tahta kalıp (boyut: 356x100x13mm).



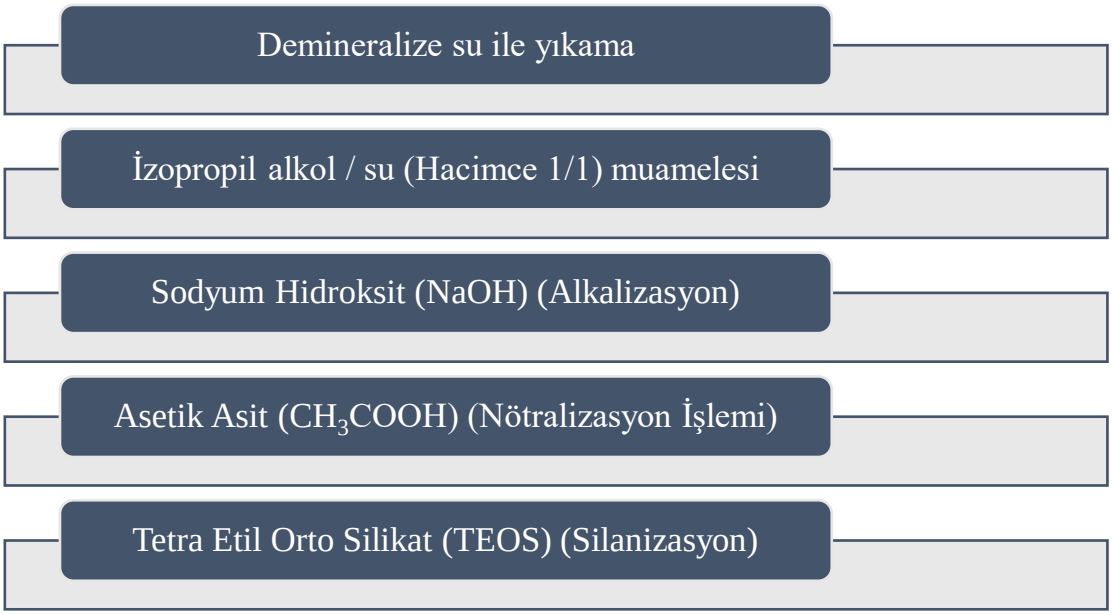
Şekil 4.2. Kompozit malzeme sentezinde kullanılacak bir kalıp ve elle yatırma yöntemi için gerekli araç
(a) Tahta kalıp (50x50x18mm) **(b)** Elyaf laminasyon rulosu.



Şekil 4.3. Elle yatırma yönteminde hava kabarcıklarını almak için kullanılan araçlar
(a) Spatula **(b)** laminasyon fırçası.

4.2. Deneysel Yöntem

Kenevir lifleri, Samsun ili Vezirköprü ilçesinde üretimi gerçekleşen tarlada havuzlama işlemi uygulanmış olarak temin edilmiştir. Kenevir liflerine fiziksel ve kimyasal yüzey geliştirme yöntemleri belirli bir sıraya göre uygulanmıştır. Aşamalar Şekil 4.4' de gösterilmiştir ve bu aşamaların uygulamaları hakkındaki detaylara yer verilmiştir.



Şekil 4.4. Lifler üzerine uygulanan fiziksel ve kimyasal safsızlıkların giderimi için aşamalar.

4.2.1. Demineralize su ile yıkama

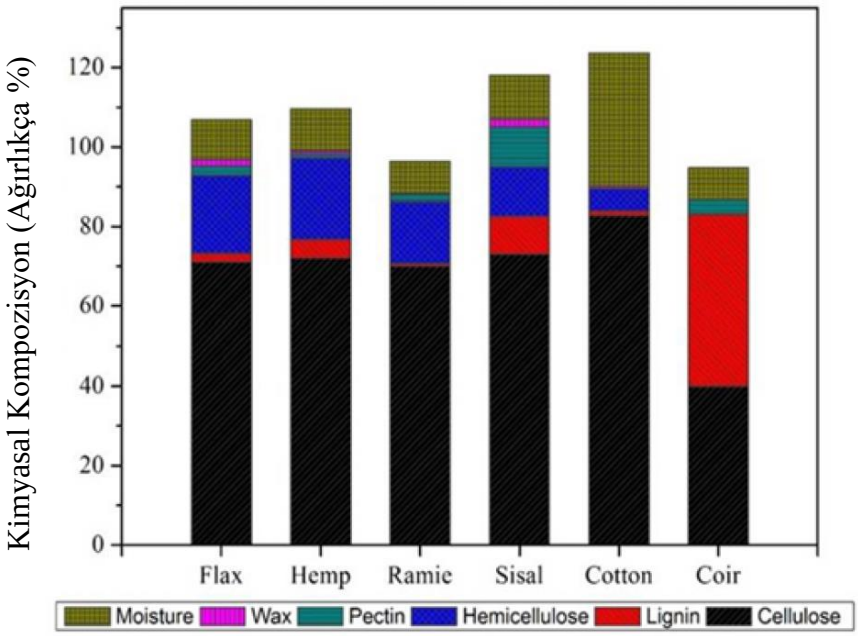
Kompozit malzeme sentezinde kullanılacak olduğumuz kenevir liflerini düzenli bir şekilde keserek demineralize su ile yıkama işlemini gerçekleştirilmiştir. Bu yıkama işleminin amacı ise liflerde bulunan iri odun parçalarını çıkarmak, liflerin yüzeyinde bulunan çamur ve balmumu gibi safsızlıkları gidermektir. Yıkama işlemi sırasında liflerdeki safsızlıklar azaldıkça gözle görülür şekilde sudaki bulanıklık azalır. Yıkama işlemi sudaki bulanıklık azaldığında tamamlanır ve bir sonraki adım olan izopropil alkol / su ile yıkama işlemine geçilir (Dayo vd., 2018b).

4.2.2. İzopropil alkol / su ile yıkama

Demineralize su ile yıkanan liflerdeki fiziksel safsızlıklar sadece su ile yıkama ile giderilemez. Bu sebepten fiziksel safsızlıkların daha da önüne geçebilmek için hacimce 1/1 izopropil alkol / su karışımı hazırlanır ve lifler bu homojen karışım içerisinde de dikkatlice yıkanır ve temizlenir. Yıkama işlemi sonuçlandıktan sonra liflerin üzerindeki sıvı karışımı silkelenip iri parçalar elle ayrılarak düzenli yapıdaki lifler 80°C deki vakumlu etüvde gece boyunca kurumaya bırakılır (Dayo vd., 2018b).

4.2.3. Alkalizasyon

Bir önceki gün demineralize su ve izopropil alkol / su karışımında fiziksel safsızlıkları giderilen lifler bu defa bir alkalizasyon işleminden geçirilir. Burada kullanılacak alkali solüsyon için uygun fiyat ve bulunabilirlik sebebiyle sodyum hidroksit (NaOH) tercih edilmiştir. Liflerdeki doğal yağlar, balmumu, lignin ve pektin gibi lif bileşenlerinin giderilmesine etki eder (Oushabi vd., 2017). Kenevir liflerinin alkali muamelesi için ağırlıkça %6 oranında NaOH çözeltisi hazırlanmıştır. Ağırlıkça %6 oran; Mishra ve ark.'nın sisal lifleri için iki farklı konsantrasyon olan %5 ve %10 denemeleri sonucunda %5 konsantrasyonu ile muamele edilmiş sisal liflerinin daha iyi mukavemet sergilemiştir (Mishra vd., 2003). Farklı bitki liflerinin farklı kimyasal kompozisyonları sebebiyle Şekil 4.5'de verilmiş oranlar gözetilerek de ağırlıkça %6 NaOH konsantrasyonu ile alkalizasyon işlemi yapmaya karar verilmiştir (Shah vd., 2017). Hazırlanan alkali solüsyonda kullanılan NaOH konsantrasyonun büyük önemi vardır. Bu yüzden çok yüksek (ağırlıkça %98) veya çok düşük (ağırlıkça %1) konsantrasyonlarda son ürün olan kompozit malzemenin mekanik dayanımlarını olumsuz etkileyebilir. Alkali işlemlerin bir diğer etkisi ise termal karalılık kazandırmak ve lifler ile polimer matris arasındaki uyumsuzluğu azaltarak birbirlerine daha iyi yapışma özelliği kazandırarak uyumlu bir birliktelik oluşturmaktır. Alkalizasyon işleminde lifler 4saat süreyle alkali çözelti içerisinde bekletilir. Ardından asetilasyon (nötralizasyon) işlemi ile devam edilir (Dayo vd., 2018b).



Şekil 4.5. Farklı bitkilerin kimyasal kompozisyonları

4.2.4. Nötralizasyon

Alkalizasyon işlemiyle pH değeri 11 ile 13 aralığına çıkan liflerin nötralizasyonu için ağırlıkça %1'lik asetik asit (CH_3COOH) çözeltisi hazırlanmış ve liflerin pH değeri nötrleştirilmiştir. Asetilasyon (nötralizasyon) işleminin amacı ise liflerin higroskopik özelliklerinin azaltılması ve liflere boyutsal kararlılık vermesidir (Li vd., 2007). Alkali işlem sonrası lifler saf su ile birkaç defa yıkanır. Ardından hazırlanan asetik asit çözeltisine daldırılır ve 2 saat bekletildikten sonra alkali çözelti ile pH değeri asetik asit çözeltisinden ötürü 4-5 aralığındaki lif daldırılmış asetik asit çözeltisinin pH değeri 7 olasıya kadar titrasyon gerçekleştirilir. pH değeri 7 olduğunda 1 saat süreyle beklenir ve tekrar demineralize su ile yıkama işlemi yapılır. Yıkama işleminin ardından düzenlenen lifler 80°C de vakumlu etüvde gece boyunca kurutulur (Dayo vd., 2018b).

4.2.5. Silanizasyon

Silanizasyon işlemiyle hidrofilik doğaya sahip kenevir lifi ile hidrofobik yapıdaki epoksi reçine matrisinin biribirlerine bağlanma gücünün artırılması amaçlanmıştır. Farklı birçok silan birleştirme ajanları mevcuttur. Bu çalışmada Tetra Etil Orto Silikat (TEOS) silan birleştirme ajanı kullanılmıştır. Silan çözeltisi hazırlarken litre çözelti / gram lif oranına

dikkat edilerek; 1000 mL çözelti için 44,4g kenevir lifi kullanılmıştır. Silan çözeltisi hazırlığında öncelikle hacimce 6/4 oranındaki etanol/su karışımı hazırlanıp 30 dakika boyunca karıştırılır. Silan çözeltisi ağırlıkça %5 oranında kullanılacaktır. 600/400 mL karışımı sağlanan çözeltiden 50g eksiltilerek 50gram kadar TEOS ile 1000 mL'ye tamamlanır. Etanol/Su ve TEOS karışımının 1saat süreyle ön hidrolizi gerçekleştirilir. Ön hidroliz sonrası 44,4g kenevir lifi bu çözelti içerisine daldırılarak 3saat süreyle muamele edilir (Sepe vd., 2018). Muamele sonrası lif üzerindeki fazla silan çözelti kalıntılarını temizlemek için demineralize su ile yıkanır ve 80°C vakumlu etüvde gece boyunca kurumaya bırakılır. Kuruma sonrası lifler bir desikatörde saklanır. Epoksi reçine matris ile kenevir liflerin takviye faz olarak üretim aşamasında lifler desikatörden çıkarılıp kullanılır (Dayo vd., 2018b).

4.3. Kompozit Malzeme Üretimi

Kenevir liflerine, su ile yıkama, NaOH ile mumale, CH_3COOH ile muamele ve TEOS ile muameleleri sırasıyla ardı ardına kombine olarak gerçekleştirilmiştir. Muamelelerden geçirilmiş lifler kompozit malzeme üretimine hazır hale gelmiştir. Reçine ve sertleştirici karışımı hazırlandıktan sonra elle yatırma yöntemi ile kompozit malzeme sentezi gerçekleştirildi. Hazırlanan kompozit malzemelerin lif içerikleri %5, 10, 20 ve 33,3'tür ve sırasıyla KE5, KE10, KE20, KE33,3 kodları verilmiştir. Alev geciktirici katkılı kompozit malzemesinde ise ağırlıkça %10 kenevir lifi (kod; KEA10) kullanılarak kompozit malzeme sentezi gerçekleştirilmiştir. Kenevir lifinin yoğunluğu 1,48g/cm^3'tür. Epoksi reçine yoğunluğu ise 1,10g/cm^3'tür.

Kenevir Lifi (KE), Epoksi reçine (EPO) kısaltmaları ile gösterilecektir.

- **Ağırlıkça %10 kenevir lifi ve %90 epoksi reçine içeren kompozit malzemenin üretimi;**

Kullanacağımız çelik kalıp ölçüleri (16x4x4) cm^3.

Kenevir lifi ve epoksi reçinenin hacim hesaplamaları için Denklem (4.1) kullanılacaktır.

$$d = m/V \tag{4.1}$$

$V= m/d => V_{HF} = 10g/1,48\ g/cm^3 => V_{HF} = 6,76cm^3$.

$d = m/V => V= m/d => V_{EPO} = 90g/1,10\ g/cm^3 => V_{EPO} = 81,81cm^3$.

$V_{KE} + V_{EPO} = 88,58\ cm^3$.

Kalıbımızın hacmi; $16x4x4 = 256cm^3$ hacmindeki kalıbı doldurmak amacıyla HF ve EPO için gerekli hacim miktarının hesabı;

$256cm^3 / 88,58cm^3 = 2,89$.

$V_{KE} = 6,76cm^3 \text{ x } 2.89 => V_{HF} = 19,53cm^3$,

$V_{EPO} = 81,81cm^3 \text{ x } 2,89 => V_{EPO} = 236,43cm^3$ olacaktır.

Yukarıda kalıbı doldurmak için gerekli olan kenevir lifi ve epoksi reçinenin hacimleri belirlenmiştir. Yoğunlukları belirli olan kenevir lifi ve epoksi reçine için ağırlık belirlemek üzere;

$m_{KE} = d \text{ x } V => m_{KE} = 1,48\ g/cm^3 \text{ x } 19,53cm^3 => m_{KE} = 28,90g$,

$m_{EPO} = d \text{ x } V => m_{EPO} = 1,10\ g/cm^3 \text{ x } 236,43cm^3 => m_{EPO} = 260,07g$.

Ağırlıkça %10 kenevir lifi, %90 epoksi reçine içeren ve 16x4x4 cm^3 hacimli çelik bir kalıp kullanılarak üretilecek kompozit malzemenin gerekli miktarları belirlendi. Öncelikle kalıp ayırıcı wax 24 saat kürlenmeye bırakılan kalıptan kompozit malzemenin rahat bir şekilde ayrılması için uygulanır. Wax uygulaması sonrasında kalıbın tabanına bir miktar matris malzemesi uygulanır ve üzerine işlem görmüş kenevir lifleri serilir. Kenevir liflerinin matris malzemesi ile tamamen ıslatıldığından emin olmak için ıspatula yardımıyla matris

malzemesi lifler üzerine homojen olacak şekilde dağıtılır. Daha sonra laminasyon rulosu ile oluşan hava kabarcıkları giderilir. Kalıbın tamamı için kullanılacak lifler kalıba pararlel ve 4 katmandan oluşacak şekilde serilerek her katman arasına matris malzemesi ile muamele gerçekleştirilmiştir. Tüm üretim işlemleri bu noktada son bulmuş ve kürlenmesi için 24 saat süreyle oda koşullarında bekletilmiştir.

- **Ağırlıkça %10 kenevir lif takviyeli ve ağırlıkça %8 Amonyum Polifosfat alev geciktirici katkılı kompozit malzemenin üretimi;**

Kenevir lifi ve epoksi reçinenin hacim hesaplamaları için Denklem (4.1) kullanılmıştır.

$d = m/V \Rightarrow V = m/d \Rightarrow V_{KE} = 10/1,48 \Rightarrow V_{KE} = 6,76cm^3$.

$d = m/V \Rightarrow V = m/d \Rightarrow V_{EPO} = 90/1,10 \Rightarrow V_{EPO} = 81,81cm^3$.

$V_{KE} + V_{EPO} = 88,58\ cm^3$.

Kalıbımızın hacmi; $35,6x10x1,8 = 640,8cm^3$ hacmindeki kalıbı doldurmak amacıyla HF ve EPO için gerekli hacim miktarının hesabı;

$640,8cm^3 / 88,58cm^3 = 7,23$.

$V_{KE} = 6,76cm^3 \times 7,23 \Rightarrow V_{KE} = 48,87cm^3$,

$V_{EPO} = 81,81cm^3 \times 7,23 \Rightarrow V_{EPO} = 591,48cm^3$ olacaktır.

- Yukarıda kalıbı doldurmak için gerekli olan kenevir lifi ve epoksi reçinenin hacimleri belirlenmiştir. Yoğunlukları belirli olan kenevir lifi ve epoksi reçine için ağırlık belirlemek üzere;
- $m_{KE} = d \times V \Rightarrow m_{KE} = 1,48\ g/cm^3 \times 48,87cm^3 \Rightarrow m_{KE} = 72,32g$,
- $m_{EPO} = d \times V \Rightarrow m_{EPO} = 1,10\ g/cm^3 \times 591,48cm^3 \Rightarrow m_{EPO} = 650,62g$.

Hazırlanacak olan reçine ve sertleştirici karışımından önce karışıma eklenecek ağırlıkça %8 APP miktarı belirlendi. Reçine, sertleştirici ve alev geciktirici katkısı APP, bir kapta homojen oluncaya dek karıştırıldı. Kalıbımıza öncelikle kalıp ayırıcı wax uygulanıp kalıpta sabitlenmesi için bir süre bekletildi. Hazır bulunan reçine, sertleştirici ve APP

karışımı kalıba ince bir katman halinde uygulandı ve lifler bu katman üzerine elle yatırma metodu ile serildi. Serilen liflerin üzerine reçine, sertleştirici ve APP karışımı uygulandı ve 4 katmandan oluşacak şekilde bu işlemler tekrarlandı. 24 saat oda koşullarında kürlenme sağlandı (Şekil 4.6) ve kalıptan kompozit malzeme ayrıldı. Reçine, sertleştirici ve APP karışımı %10 kenevir lif takviyeli kompozit malzeme (kod; KEA10) elle yatırma metoduna göre üretimi Şekil (4.7)' de verilmiştir. Alev geciktirici katkısı olarak kullanılan APP etkisini gözlemlemek amacıyla aynı boyutlarda APP katkısı olmadan ağırlıkça %10 kenevir lif içeriğine sahip kompozit malzeme de hazırlanmıştır.



Şekil 4.6. APP katkılı kompozit malzemenin (kalıp boyutu: 356x100x13mm) oda koşullarında kürlenme süreci.



Şekil 4.7. Alev geciktirici katkılı kompozit malzemenin elle yatırma metoduna göre üretimi.

Kompozit malzemelere yapılacak testler için istenilen boyutlarda kalıplar hazırlanarak üretimler gerçekleştirilmiştir. Üretimlerde yukarıdaki hesaplamalar baz alınarak aşağıdaki şekilde kenevir lif miktarı ve reçine miktarları belirlenerek testler uygulandı. Aynı kenevir liflerine aynı yüzey geliştirme uygulamaları yapıldı. Lif ve APP

miktarlarına göre kodlamalar KE5, KE10, KE20, KE33,3 ve KEA10 şeklinde sırasıyla ağırlıkça %5, %10, %20, %33,3 ve %10 kenevir ile %8 APP katkılı biyokompozitlerdir.

- Eğilme testleri; ağırlıkça %5, 10, 20 ve 33,3 kenevir lif takviyeli 4 adet (boyut: 160x40x40mm) kompozit malzeme ile APP takviyeli %10 kenevir lif içerikli kompozit malzemelere uygulanmıştır. Eğilme testi yapılan APP katkılı kompozit malzemesi için KEA10 kodu kullanılacaktır.

- Basınç testleri; ağırlıkça %5, 10, 20 ve 33,3 kenevir lif takviyeli 4 adet (boyut: 40x40x40mm) kompozit malzeme ile APP takviyeli %10 kenevir lif içerikli kompozit malzemelere uygulanmıştır. Basınç testi yapılan APP katkılı kompozit malzemesi için KEA10 kodu kullanılacaktır.

- Isı iletim katsayı testleri; ağırlıkça %5, 10, 20 ve 33,3 kenevir lif takviyeli 40x40x40mm ölçülerinde 4 adet kompozit malzemeler ile APP takviyeli ağırlıkça %10 kenevir lif içerikli kompozit malzemelere uygulanmıştır. Isı iletim katsayı testi yapılan APP katkılı kompozit malzeme için KEA10 kodu kullanılacaktır.

- Ses yutum katsayı testleri; ağırlıkça %5, 10 ve 20 kenevir lif takviyeli 29mm çapa ve 30mm yüksekliğe sahip kompozit malzemeler ile APP takviyeli ağırlıkça %10 kenevir lif içerikli kompozit malzemelere uygulanmıştır. Ses yutum katsayı testi yapılan APP katkılı kompozit malzeme için KEA10 kodu kullanılacaktır.

- Vakumlu su emme testi; ağırlıkça %5, %10 ve %20 kenevir lif içerikli 50x50x18mm boyutlarında kompozit malzemelere uygulanmıştır.

- Yatay yanma hızının belirlenmesi ve alev geciktiricinin etkisinin de gözlenmesi için APP katkılı ve katkısız kompozit malzemeleri ağırlıkça %10 kenevir lif içeriğine sahip olacak şekilde hazırlandı ve test edildi.

4.4. Elde Edilen Kompozit Malzemelerin Karakterizasyon Çalışmaları

Bina yalıtım uygulamaları için hazırlanan kompozit malzemeler; ısı iletim katsayısı için kenevir lifi ağırlıkça %5, %10, %20, %33,3 ve KEA10; eğilme testi için kenevir lifi ağırlıkça %5, %10, %20, %33,3 ve KEA10; basınç testi için kenevir lifi ağırlıkça %5, %10, %20, %33,3 ve KEA10; ses yutum katsayısı için kenevir lifi ağırlıkça %5, %10, %20, %33,3 ve KEA10; alev geciktirici testi için kenevir lifi ağırlıkça %10, APP katkılı ve katkısız; son olarak vakumlu su emme testi için kenevir lifi ağırlıkça %5, %10 ve %20 kompozit malzemeleri hazırlanmıştır. Elde edilen kompozit malzemelerin analizleri ve ayrıntıları aşağıda verilmiş ve Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

- **Eğilme dayanım;** testlerinin %10, %20 ve %33 kenevir lif takviyeli numuneleri Akdeniz Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Laboratuvarında UTEST cihazıyla gerçekleştirilmiştir, %5 kenevir lif takviyeli numunesi ise Başergün Boya ve Kimya İnş. San. Tic. A.Ş.' de Baz Makine test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Üç noktalı eğilme dayanım testinde cihaz malzemenin tam ortasından yük uygulamaya başlar. Test cihazı, uygulanan yük ile yer değiştirme değerlerini bilgisayar ortamında sunar. Sunulan bu değerlere göre Denklem (3.2-3.3) kullanılarak birim şekil değiştirme ve eğilme gerilmesi hesaplanır (Çizelge (5.1-5.5) ve Şekil (5.1-5.5)).
- **Basınç dayanım;** testleri Akdeniz Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Laboratuvarında maksimum gücü 2000 kilo Newton (kN) olan Yüksel Kaya Makine test ekipmanında gerçekleştirilmiştir.
- **Yanma dayanımı;** Bilecik Formplast Yalıtım Ürünleri İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş de 10.001 Yanma Test Cihazında FMVSS302 standardına göre test edilmiştir.
- **Ses yutum katsayısı;** Bilecik Formplast Yalıtım Ürünleri İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş' de bir empedans tüpü kullanılarak ASTM-C384 standardına göre ölçülmüştür.
- **Vakumlu su emme;** Bilecik Formplast Yalıtım Ürünleri İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş de 09.001 Devotrans Vakum Altında Su Emicilik test cihazında test edilmiştir.
- **Isı iletim katsayısı;** Eskişehir Teknik Üniversitesi, Seramik Araştırma Merkezi (SAM)'nde bulunan Termal İletkenlik cihazı C-Therm kullanılarak belirlenmiştir.
- **Yoğunluk tayini;** Ağırlıkça farklı lif içerikli kompozit malzemelerden silindirik malzemeler kesilerek ağırlığı, yüksekliği ve çapından yola çıkarak malzemelerin yoğunluklar belirlenmiştir. Çizelge 4.1'de tüm malzemelerin ölçüleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Ağırlıkça farklı lif içeriklerine sahip kompozit malzemelerin yoğunluk tayini için ölçüleri.

	Numune Adları				
Ölçüler	KE5	KE10	KEA10	KE20	KE33,3
Kütle	21,17	21,88	21,29	21,78	12,06
Çap	28,32	28,41	28,38	25,54	24,22
Yükseklik	29,58	30,78	29,42	30,42	27,97

Çizelge 4.2. Biyokompozit malzemelere yapılan yüzey geliştirme işlemleri.

	Numune Kodları				
İşlemler	**KE5**	**KE10**	**KE20**	**KE33,3**	**KEA10**
Su ile yıkama	✓	✓	✓	✓	✓
NaOH ile muamele	✓	✓	✓	✓	✓
CH3COOH ile muamele	✓	✓	✓	✓	✓
TEOS ile muamele	✓	✓	✓	✓	✓
Kenevir Lif Oranı (%)	5	10	20	33,3	10
Epoksi Reçine Oranı (%)	95	90	80	66,7	82
Alev Geciktirici Oranı (%)	0	0	0	0	8

5.BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, ele alınan konu bina yalıtım malzemelerinin sentetik elyaf takviyeli malzemelerden doğal elyaf takviyeli malzemelere geçiş sürecinin etkinliğini inceleyerek kullanım ve üretim açısından değerlendirilmesini içermektedir. Yalıtım malzemeleri farklı sınıflara ayrılır ve her bir sınıf için farklı özellikler aranır. Isı yalıtım, ses yalıtım, su yalıtım, alev dayanım gibi yalıtım türleri için aranan özellikler üzerine eğilme dayanımı, basınç dayanımı, ısı iletim katsayısı, ses yutum katsayısı, alev dayanımı ve vakumlu su emme testleri bu başlık altında incelenmiştir.

5.1. Eğilme Dayanım Test Sonuçları

Ölçüleri belirli (160x40x40mm) olan kompozit malzeme için üç noktalı eğilme testi farklı lif içeriklerine sahip (%10, %20 ve %33,3) kompozitler için U-test marka eğilme cihazında, yükleme kapasitesi sadece %5 lif içerikli kompozit malzemeye uygun olan malzeme Baz Makine Eğileme test cihazında test edilmiş, birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Kenevir liflerine uygulanmış yüzey geliştirme işlemlerinin ardından epoksi reçine matris malzemesi ile hazırlanmış ağırlıkça %5, %10, %20, %33 kenevir lifi içeren ve %10 lif takviyeli + %8 alev geciktirici katkılı kompozit malzemeler hazırlandı. Alev geciktirici katkılı kompozit malzeme hazırlamak için Amonyum Polifosfat (APP) kullanıldı. Tüm kompozit malzemelerin eğilme dayanım testleri eğilme test cihazlarında gerçekleştirildi. Eğilme dayanım test sonuçları Çizelge (5.1-5.5)'de ve Şekil (5.1-5.5)'de verilmektedir.

Çizelge 5.1. KE5 kompozit malzemesinin fiziksel özellikleri, eğilme gerilmesi ve basınç dayanım sonuçları.

ANALİZ SONUÇLARI					
Fiziksel Özellikler				**Eğilme gerilmesi (σ), (N/mm^2)**	**Basınç dayanımı (σ), (N/mm^2)**
En (ω), (mm)	**Alan (mm^2)**	**Yükseklik (b), (mm)**	**Mesnetler arası uzaklık (L), (mm)**		
40	6400	40	100	44,86	
40	6400	40	100		72,21
40	6400	40	100		53,76

Ağırlıkça %10 kenevir lif takviyeli epoksi kompozit numunesinin eğilme gerilmesinin hesaplanması için test cihazından elde edilen veriler 151 sayfadan oluşmaktadır. Bu verilerin bir bölümüne Çizelge 5.2'de yer verilmiştir. Eğilme gerilmesine karşılık birim şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.1'de verilmiştir. Şekil değiştirme ve eğilme gerilmesinin hesabı için test cihazından elde edilen veriler ile Denklem (3.2 - 3.3) kullanarak aşağıdaki örnek hesaplama yapılmıştır.

Ağırlıkça %5 kenevir lif içeriğine sahip epoksi kompozit numunesinin basınç dayanım test sonucunda ortalama değer olarak 65,48 N/mm^2 elde edilmiştir.

Çizelge 5.2. KE10 kompozit malzemesinin eğilme gerilme analiz sonuçları.

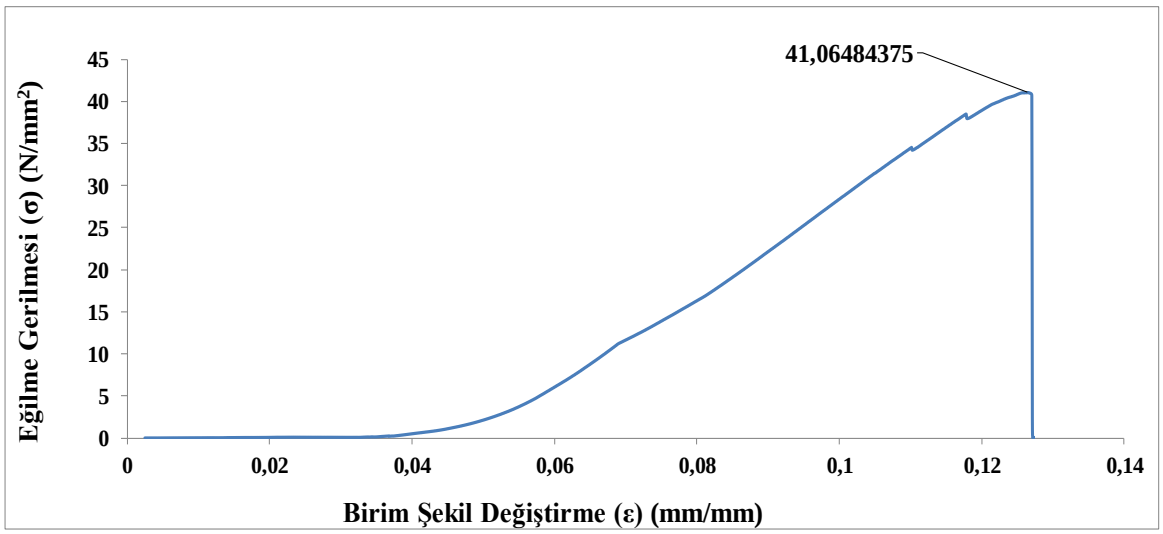
Load (Yük) (N)	Yer değiştirme (ΔL) (mm)	Birim Şekil Değiştirme (ε) (mm/mm)	Eğilme Gerilmesi (σ) (N/mm^2)
0,344	0,101	0,002525	0,00080625
0,046	0,102	0,002550	0,00010781
0,604	0,103	0,002575	0,00141563
0,194	0,105	0,002625	0,00045469
0,103	0,109	0,002725	0,00024141
0,522	0,111	0,002775	0,00122344
0,412	0,113	0,002825	0,00096563
0,679	0,114	0,002850	0,00159141
0,772	0,116	0,002900	0,00180938
0,021	0,120	0,003000	0,00004922
0,021	0,122	0,003050	0,00004922
0,564	0,124	0,003100	0,00132188
0,468	0,146	0,003650	0,00109688
0,196	0,147	0,003675	0,00045938
0,655	0,148	0,003700	0,00153516
0,332	0,159	0,003975	0,00077813
0,729	0,165	0,004125	0,00170859
0,534	0,167	0,004175	0,00125156
0,534	0,167	0,004175	0,00125156
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
17518	5,054	0,126350	41,057813
17521	5,056	0,126400	41,064844
17521	5,057	0,126425	41,064844
17521	5,059	0,126475	41,064844
17521	5,061	0,126525	41,064844
17520	5,062	0,126550	41,062500
17514	5,063	0,126575	41,048438
17508	5,065	0,126625	41,034375
17504	5,066	0,126650	41,025000
17499	5,067	0,126675	41,013281
17495	5,069	0,126725	41,003906
17495	5,069	0,126725	41,003906
17491	5,070	0,126750	40,994531
17488	5,072	0,126800	40,987500
17480	5,073	0,126825	40,968750
17472	5,074	0,126850	40,950000
17465	5,076	0,126900	40,933594
17454	5,077	0,126925	40,907813
17428	5,079	0,126975	40,846875
17364	5,080	0,127000	40,696875
7793	5,082	0,127050	18,264844

Çizelge 5.2'de yer alan verilerden Load (Yük) ve yer değiştirme (ΔL) cihaz tarafından verilmektedir. Birim şekil değiştirme (ε) Denklem (3.2) ve eğilme gerilmesi (σ) Denklem (3.3) kullanılarak hesaplanmıştır. L_0 değeri numuneye yük uygulanmadan önceki boyu olarak belirtilmektedir ve hazırlanan numunemizin boyu 40mm'dir. Bu hesaplamada en yüksek eğilme gerilmesinin elde edildiği Çizelge 5.2'deki veriler kullanarak örnek bir hesaplama aşağıda verilmektedir.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \Longrightarrow \varepsilon = \frac{5{,}061\text{mm}}{40mm} \Longrightarrow \varepsilon \text{ (birim şekil değiştirme)} = 0{,}126525$$

Eğilme gerilmesi hesabı Denklem (3.3)'e göre hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{3 \text{ x Load (Yük) x L}}{2 \text{ x } \omega \text{ x (b)}^2} \Longrightarrow \sigma = \frac{3 \text{ x } 17521 \text{ N x } 100\text{mm}}{2 \text{ x } 40\text{mm x } (40\text{mm})^2} \Longrightarrow \sigma = 41{,}0648 \text{ N/mm}^2.$$



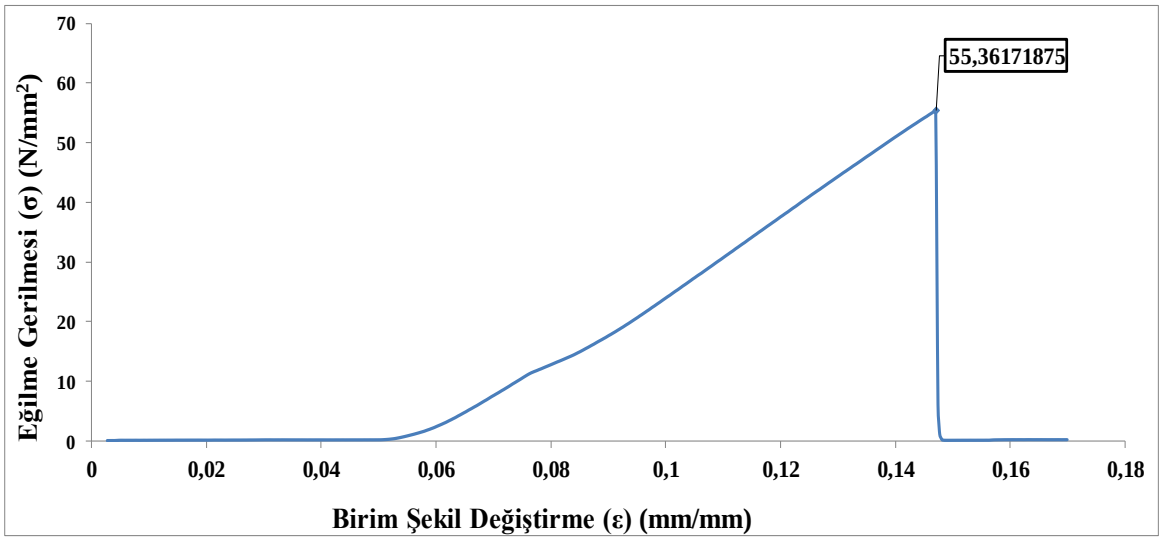
Şekil 5.1. KE10 kompozit malzemesinin eğilme gerilme testi.

Şekil 5.1 ile Çizelge 5.2 incelendiğinde kompozit malzemeye uygulanan yük miktarı arttıkça birim şekil değiştirme ve eğilme gerilmesi değerinde artış gözlenmektedir. Bu artış tamamen doğrusal değildir. Malzeme yapısında olası kılcal çatlak ve üretim aşamasında gerçekleşmiş ufak bir hata malzemeye uygulanan yüke etki edecektir. Bu durumda grafikte dalgalanmalar olabilir. Şekil 5.1 incelendiğinde yaklaşık 0,04 mm/mm birim şekil değiştirme değerinde cisme uygulanan yükün etkisi gözlenmeye başlamıştır. 41,06 N/mm^2 eğilme gerilmesi değerine ulaşan kompozit malzeme test cihazı tarafından ortadan iki parçaya kırılır. Kırılan parça ile cihaz ölçümü durdurur ve analiz verilerini bilgisayara kaydeder.

Ağırlıkça %10 kenevir lif takviyeli + Amonyum Polifosfat alev geciktirici katkılı epoksi kompozit numunesinin eğilme gerilmesinin hesaplanması için test cihazından elde edilen veriler 25 sayfadan oluşmaktadır. Bu verilerin bir bölümüne Çizelge 5.3' de, Eğilme gerilmesine - Birim şekil değiştirme grafiği Şekil 5.2'de verilmiştir

Çizelge 5.3. KEA10 kompozit malzemesinin eğilme gerilme analiz sonuçları.

Load (Yük) (N)	Yer değiştirme (ΔL) (mm)	Birim Şekil Değiştirme (ε) (mm/mm)	Eğilme Gerilmesi (σ) (N/mm^2)
7,299	0,110	0,002750	0,01710703
7,238	0,122	0,003050	0,01696406
8,567	0,133	0,003325	0,02007891
9,136	0,152	0,003800	0,02141250
8,796	0,161	0,004025	0,02061563
20,029	0,180	0,004500	0,04694297
26,743	0,189	0,004725	0,06267891
29,975	0,200	0,005000	0,07025391
30,753	0,212	0,005300	0,07207734
29,336	0,234	0,005850	0,06875625
29,840	0,242	0,006050	0,06993750
30,181	0,260	0,006500	0,07073672
30,228	0,271	0,006775	0,07084688
29,586	0,288	0,007200	0,06934219
30,650	0,299	0,007475	0,07183594
31,315	0,308	0,007700	0,07339453
29,631	0,331	0,008275	0,06944766
29,700	0,340	0,008500	0,06960938
31,256	0,357	0,008925	0,07325625
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
22123	5,659	0,141475	51,8507813
22220	5,673	0,141825	52,0781250
22320	5,687	0,142175	52,3125000
22427	5,703	0,142575	52,5632813
22522	5,717	0,142925	52,7859375
22615	5,731	0,143275	53,0039063
22720	5,747	0,143675	53,2500000
22818	5,761	0,144025	53,4796875
22913	5,775	0,144375	53,7023438
23019	5,791	0,144775	53,9507813
23111	5,805	0,145125	54,1664063
23203	5,820	0,145500	54,3820313
23203	5,820	0,145500	54,3820313
23310	5,835	0,145875	54,6328125
23416	5,851	0,146275	54,8812500
23519	5,867	0,146675	55,1226563
23621	5,883	0,147075	55,3617188
2566,9	5,899	0,147475	6,0161719
465,67	5,911	0,147775	1,0914141
85,995	5,926	0,148150	0,2015508
36,605	5,938	0,148450	0,0857930



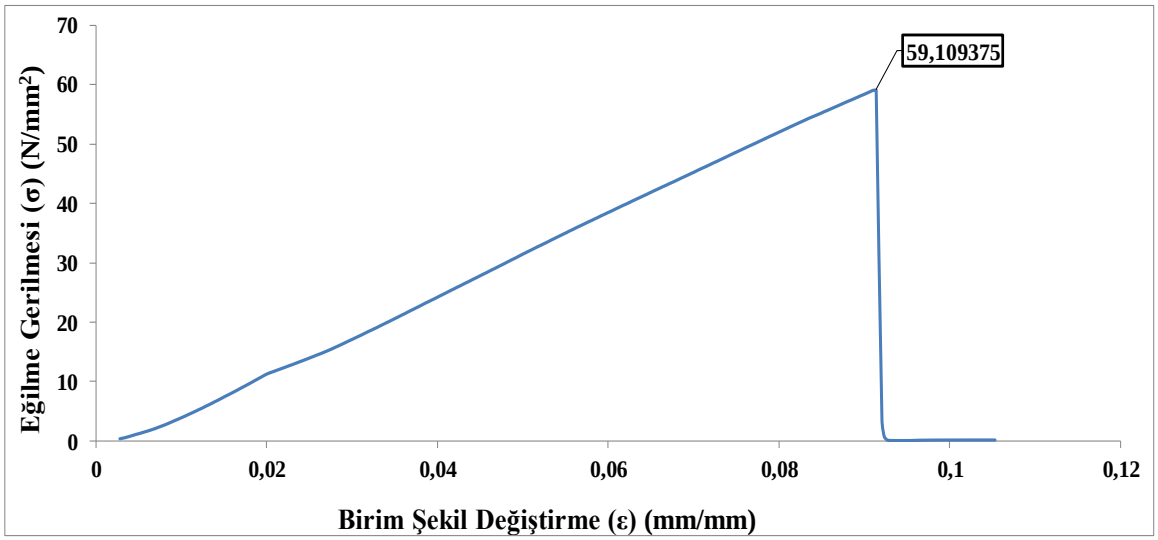
Şekil 5.2. KEA10 kompozit malzemesinin eğilme gerilme testi.

Numune test cihazının üst yükleme plakasına ortalanacak şekilde yerleştirilir. Yerleştirildikten sonra test başlatılır. Üst plaka tarafından uygulanacak yük malzemeye değene kadar hızlı bir şekilde devam ederken değdiği anda hızını düşürerek bütün verileri işlemeye başlar. KEA10 kompozit malzemesinde birim şekil değiştirme 0 mm/mm değerinin biraz üzerinde başlasa da henüz eğilme gerilmesine yönelik gerçek bir değer gözlenmez. Birim şekil değiştirmenin artışı ile eğilme gerilmesinde de artış gözlenir ve test numunesinde kırılma oluşuncaya kadar yükleme devam eder. Test numunesi Şekil 5.2'de de görüleceği üzere 55,36 N/mm^2 değerinde kırılmış ve maksimum değeri vermiştir.

KE20 kompozit malzemesinin eğilme gerilmesinin hesaplanması için test cihazından elde edilen veriler 33 sayfadan oluşmaktadır. Bu veriler Çizelge 5.4' de, "eğilme gerilme-birim şekil değiştirme" sonuçları Şekil 5.3' de verilmiştir.

Çizelge 5.4. KE20 kompozit malzemesinin eğilme gerilme analiz sonuçları.

Load (Yük) (N)	Yer değiştirme (ΔL) (mm)	Birim Şekil Değiştirme (ε) (mm/mm)	Eğilme Gerilmesi (σ) (N/mm^2)
137,95	0,110	0,002750	0,3233203
176,29	0,122	0,003050	0,4131797
213,30	0,133	0,003325	0,4999219
265,64	0,145	0,003625	0,6225938
312,87	0,156	0,003900	0,7332891
420,08	0,179	0,004475	0,9845625
473,44	0,191	0,004775	1,1096250
518,56	0,202	0,005050	1,2153750
575,96	0,214	0,005350	1,3499063
625,01	0,225	0,005625	1,4648672
732,68	0,248	0,006200	1,7172188
794,70	0,260	0,006500	1,8625781
849,51	0,271	0,006775	1,9910391
918,66	0,283	0,007075	2,1531094
990,18	0,295	0,007375	2,3207344
1062,50	0,308	0,007700	2,4902344
1147,60	0,322	0,008050	2,6896875
1224,60	0,334	0,008350	2,8701563
1316,60	0,348	0,008700	3,0857813
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
23747	3,423	0,085575	55,657031
23829	3,435	0,085875	55,849219
23923	3,449	0,086225	56,069531
24018	3,463	0,086575	56,292188
24104	3,476	0,086900	56,493750
24286	3,502	0,087550	56,920313
24380	3,516	0,087900	57,140625
24470	3,530	0,088250	57,351563
24550	3,543	0,088575	57,539063
24649	3,557	0,088925	57,771094
24743	3,571	0,089275	57,991406
24826	3,583	0,089575	58,185938
24921	3,598	0,089950	58,408594
25016	3,612	0,090300	58,631250
25114	3,626	0,090650	58,860938
25208	3,640	0,091000	59,081250
25220	3,654	0,091350	59,109375
25220	3,654	0,091350	59,109375
1504,9	3,681	0,092025	3,527109
339,73	3,691	0,092275	0,796242
63,684	3,704	0,092600	0,149259



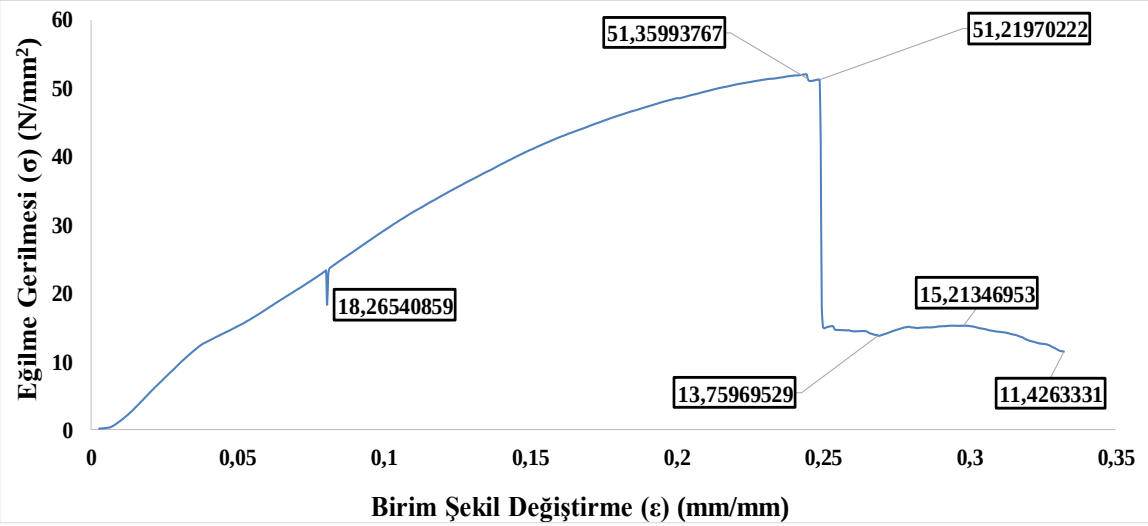
Şekil 5.3. KE20 kompozit malzemesinin eğilme gerilme testi.

KE20 kompoziti diğer kompozit malzemelere göre farklı bir grafik vermiştir. Bu fark; eğilme gerilmesi değerinin başlangıçta gözlenebilir olmasıdır. Sebebi ise numune ile üst plaka arasındaki mesafenin hızlandırılmış olmasıdır. Böylece numuneye uygulanacak yük daha kısa zamanda uygulanmış ve test sonucu elde edilmiştir.

Ağırlıkça %33,3 kenevir lif takviyeli epoksi kompozit numunesinin eğilme gerilmesinin hesaplanması için test cihazından elde edilen veriler 85 sayfadan oluşmaktadır. Bu verilerin bir bölümüne Çizelge 5.5' de, "eğilme gerilme-birim şekil değiştirme" sonuçları ise Şekil 5.4' de verilmiştir.

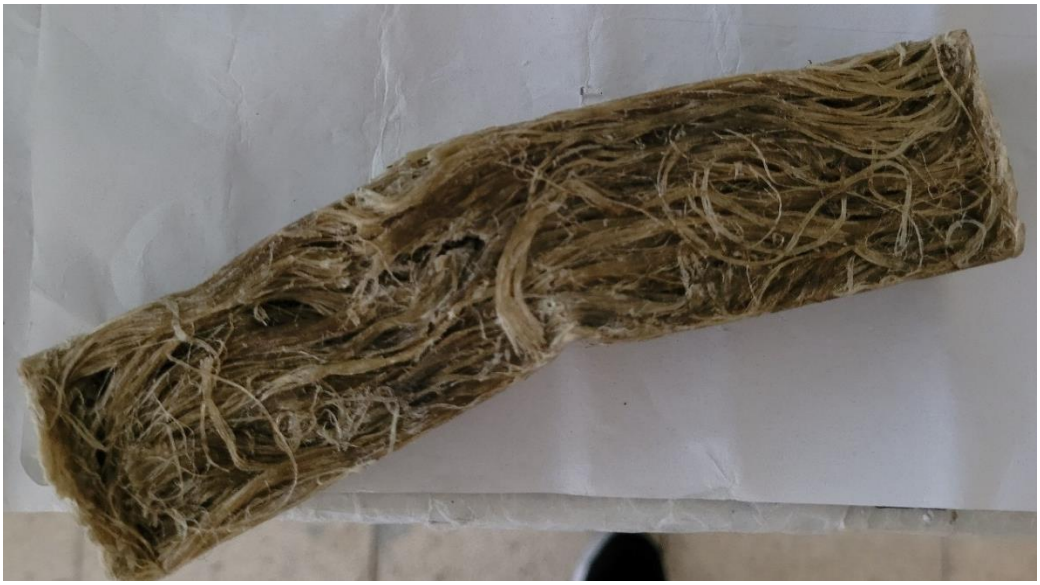
Çizelge 5.5. KE33,3 kompozit malzemesinin eğilme gerilme analiz sonuçları.

Load (Yük) (N)	Yer değiştirme (ΔL) (mm)	Birim Şekil Değiştirme (ε) (mm/mm)	Eğilme Gerilmesi (σ) (N/mm^2)
52,098	0,108	0,00270	0,1352961
56,813	0,120	0,00300	0,1475407
61,107	0,133	0,00333	0,1586920
66,044	0,145	0,00363	0,1715132
73,306	0,166	0,00415	0,1903722
76,664	0,175	0,00438	0,1990928
85,085	0,195	0,00488	0,2209617
90,664	0,205	0,00513	0,2354501
97,712	0,216	0,00540	0,2537535
104,480	0,226	0,00565	0,2713296
122,140	0,249	0,00623	0,3171918
134,540	0,262	0,00655	0,3493940
153,230	0,272	0,00680	0,3979311
173,380	0,283	0,00708	0,4502597
201,630	0,295	0,00738	0,5236236
234,150	0,308	0,00770	0,6080765
265,610	0,320	0,00800	0,6897767
307,270	0,334	0,00835	0,7979657
376,950	0,359	0,00898	0,9789214
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
20017	9,730	0,24325	51,983206
20026	9,746	0,24365	52,006579
20034	9,763	0,24408	52,027355
20034	9,763	0,24408	52,027355
20027	9,779	0,24448	52,009176
19777	9,793	0,24483	51,359938
19677	9,808	0,24520	51,100242
19659	9,823	0,24558	51,053497
19659	9,838	0,24595	51,053497
19665	9,852	0,24630	51,069079
19675	9,866	0,24665	51,095048
19691	9,882	0,24705	51,136600
19705	9,896	0,24740	51,172957
19721	9,912	0,24780	51,214508
19734	9,926	0,24815	51,248269
19733	9,940	0,24850	51,245672
19723	9,956	0,24890	51,219702
16248	9,970	0,24925	42,195291
16248	9,970	0,24925	42,195291
7036	9,984	0,24960	18,273199

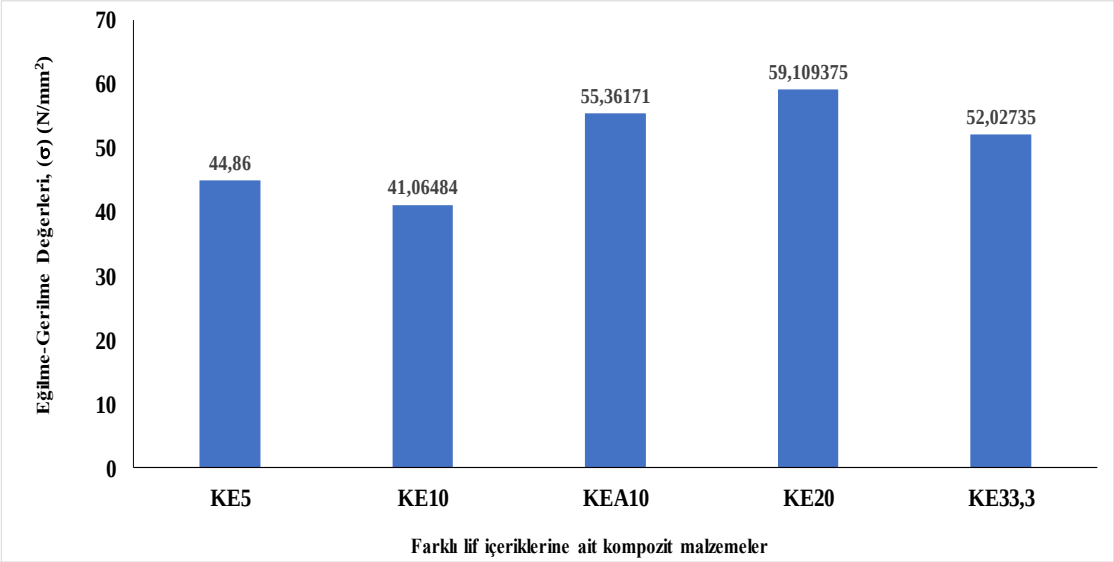


Şekil 5.4. KE33,3 kompozit malzemesinin eğilme gerilme testi.

KE33,3 kompozit malzemesinin eğilme gerilmesinde elde edilen grafik birkaç farklı noktada pikler ve dalgalanmalar vermiştir. Bunlardan 18,26 N/mm^2 değerini ele alalım. Bu değerde pik aşağı yöndedir. Bu durumda test cihazı malzemeyi kırılmış olarak algılanmış ve üst plaka uygulanan yükü düşürmeye başlamış. Malzemede bir kırılma gerçekleşmemiştir. Bu durumda test cihazı yük uygulamaya devam etmiş ve 51,35 N/mm^2 değerinde çok az da olsa aşağı yönde yani uygulanan yük miktarını düşürerek teste devam etmiştir. 51,21 N/mm^2 değerinden sonra uygulanan yükte büyük bir düşüş gerçekleşmiş fakat malzeme hala kırılamamıştır. KE33,3 kompozit malzemesi için birim şekil değiştirme değeri 0,25'ten sonra devam etmiş fakat eğilme gerilmesi değeri 10-15 N/mm^2 aralığında dalgalanmalara devam etmiştir. Cihaz testi otomatik olarak sonlandırmamıştır. Gözlemlenen dalgalanmalar ve test numunesindeki şekil değişikliğine göre test manuel olarak sonlandırılmıştır. Şekil 5.5'de eğilme test sonrası kırılmayan ancak şekil değişikliği gösteren KE33,3 malzemesinin görseli verilmiştir.



Şekil 5.5. KE33,3 kompozit malzemesinin eğilme test sonrasında görüntüsü.



Şekil 5.6. Farklı lif içeriklerine sahip kompozit malzemelerin eğilme gerilmelerinin karşılaştırması.

Çizelge 5.6. Kenevir lif takviyeli kompozitlerin eğilme özelliklerinin karşılaştırılması.

Hacimce %25 Kenevir Lifi	**Eğilme Özellikleri**		**Referans**
Numune Adı	**Dayanım (σ), (N/mm^2)**	**Birim Şekil Değiştirme (%)**	
Polibenzoksazin Reçine	26,7 ± 1,3	1,51 ± 0,06	**Dayo vd., (2018)**
Polibenzoksazin (Su ile yıkanmış lifler)	35,2 ± 1,6	1,12 ± 0,04	
Polibenzoksazin (Alkali mumaleden geçirilmiş lifler)	44,8 ± 1,9	1,31 ± 0,09	
Polibenzoksazin (Silan ile muameleden geçirilmiş lifler)	52,2 ± 1,2	1,48 ± 0,05	
Ağırlıkça %20 Kenevir Lifi	**Dayanım (σ), (N/mm^2)**	**Birim Şekil Değiştirme, (ε), (mm/mm)**	**Bu Çalışma**
Numune Adı	59,11	0,0913	
KE20			

Ağırlıkça farklı lif içeriklerine sahip epoksi esaslı kenevir lif ile güçlendirilmiş kompozit malzemelerinin eğilme dayanımları test edilmiştir. Eğilme testine tabi tutulmuş kompozit malzemelerin karşılaştırmalı sonuçları Şekil 5.6'da verilmiştir. Bu karşılaştırmaya göre en iyi sonucu KE20 malzemesi vermiştir. KE5 ile KE10 arasındaki eğilme dayanım sonucunun birbirine yakın ve hatta KE10 malzemesinin eğilme dayanım değerinin daha düşük olduğu gözlenmiştir. KE10 ile KEA10 malzemeleri aynı lif miktarına sahip olmasına rağmen KEA10'un daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Sonuçların bu şekilde çıkması; elle yatırma metodunda üretilen ve üretim sırasındaki elyafların dağılımı, elyaf/matris uyumluluğu, uygulanan reçinede oluşmuş olabilecek hava kabarcıkları ve boşluklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Çizelge 5.6'da polibenzoksazin bazlı kenevir lif takviyeli kompozit malzemelerinin eğilme özelliklerinin bu çalışma ile olan karşılaştırması verilmiştir (Dayo vd., 2018b).

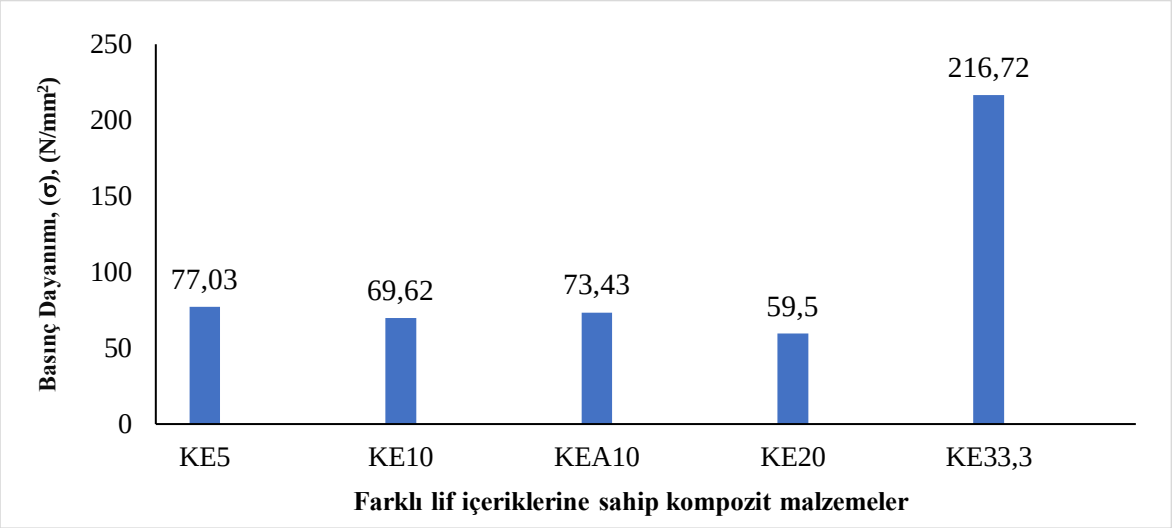
Kenevir lif ve poliüretan (PU) ile sentezini gerçekleştiren Sair vd., (2018), ağırlıkça kenevir lif miktarını artırarak 200x200x30 mm^3 ölçülerinde eğilme dayanımlarını test etmişlerdir. Çizelge 5.7'de poliüretan bazlı kenevir lif takviyeli kompozit malzemelerinin bu çalışma ile olan karşılaştırmaları verilmiştir (Sair vd., 2018).

Çizelge 5.7. Kenevir lif takviyeli kompozitlerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılması.

Fiber içeriği (%)	Eğilme Dayanımı, (σ), (N/mm^2)	Referans
PU	1,029 ± 0,123	Sair vd., (2018)
PU %5	1,150 ± 0,138	
PU %10	1,206 ± 0,144	
PU %15	1,413 ± 0,168	
PU %20	1,182 ± 0,141	
PU %25	0,871 ± 0,104	
PU %30	0,675 ± 0,081	
KE5	44,86	Bu Çalışma
KE10	41,06	
KEA10	55,36	
KE20	59.10	
KE33,3	52,02	

5.2. Basınç Dayanım Test Sonuçları

Basınç dayanım testleri Yüksel Makine cihazının 2000kN ölçüm yapan ve yükleme hızı 135kN/s olan cihazında malzeme ölçülerinin 40x40x40mm olmasına dikkat edilerek test edilmiştir. KE5, KE20 ve KE33,3 kompozitleri için en az iki tekrar basınç dayanım testi yapılmıştır. KE10 ve KEA10 malzemeleri için ise birer kez basınç testi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar ortalamalar alınarak hesaplanmış ve Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7. Farklı lif içeriklerine sahip kompozit malzemelerinin basınç dayanımları.

Basınç dayanım testlerinin gerçekleştirilmesi için malzemeler 40x40x40 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Basınç dayanım test cihazı analiz sonuçlarını maksimum değerlerini sunacak şekilde programlanmıştır. Test sırasında cihaz ekranından yük miktarı takip edilerek düşüşe geçmeye başladığında test manuel olarak sonlandırılmıştır. Maksimum yük miktarı, dayanım ve yükleme hızı verileri cihaz ekranından not alınmıştır. Kompozit malzemelerinden en iyi basınç dayanım sonucunu %33,3 lif takviyeli numune 216,72 N/mm^2'lik değer ile vermiştir. Basınç dayanım testine tabii tutulan KE33,3 kompozit malzemesinin öncesi ve sonrasına ait görsel Şekil 5.8'de verilmiştir. Lif miktarının artışı ve malzemelerin olabildiğince homojen bir şekilde üretilmesi basınç dayanım değerini artırmaktadır. KE33,3 kompozit malzemesinin diğer malzemelere kıyasla epoksi reçine miktarının az, kenevir lif miktarının fazla olması malzemenin parçalanmasına izin vermemiştir. Belirli kılcal çatlaklar sonrasında malzeme giderek ezilmiş fakat bir parçalanma söz konusu olmamıştır. Diğer malzemelerde oluşan kılcal çatlaklar ve kırılmalar sebebiyle basınç dayanım testlerinde yük miktarı düşüş göstermiş, %33,3 oranında kenevir lif takviyeli kompozit malzeme ise ezilmesine rağmen cihaz tarafından belirli bir süre yük uygulanmaya devam etmiştir. KE33,3 kompozit malzemesinin basınç dayanım değeri malzemenin Şekil 5.8'de de görüldüğü gibi çok fazla ezilmesi, şekil değiştirmesinden kaynaklanmıştır.



Şekil 5.8. KE33,3 kompozit malzemesinin basınç dayanım test öncesi ve sonrası.

Dayo vd. (2018) kenevir lif takviyeli polibenzoksazin kompozitleri için basınç dayanım özelliklerini incelemişlerdir. Çizelge 5.8'de polibenzoksazin bazlı kenevir lif takviyeli kompozit malzemelerinin basınç özelliklerinin bu çalışma ile olan karşılaştırması verilmiştir (Dayo vd., 2018b).

Çizelge 5.8. Kenevir lif takviyeli kompozitlerin basınç özelliklerinin karşılaştırılması.

Hacimce %25 Kenevir Lifi	**Basınç Özellikleri**		**Referans**
Numune Adı	**Dayanım, (P), (N/mm^2)**	**Birim Şekil Değiştirme (%)**	
Polibenzoksazin Reçine	103,7 ± 2,1	2,82 ± 0,09	**Dayo vd., (2018)**
Polibenzoksazin (Su ile yıkanmış lifler)	112,2 ± 2,3	2,83 ± 0,06	
Polibenzoksazin (Alkali mumaleden geçirilmiş lifler)	113,9 ± 2,7	2,75 ± 0,11	
Polibenzoksazin (Silan ile muameleden geçirilmiş lifler)	123,2 ± 1,9	2,66 ± 0,12	
Ağırlıkça %5 ve %33,3 Kenevir Lifi	**Dayanım, (P), (N/mm^2)**	———	**Bu Çalışma**
Numune Adı			
KE5	77,03		
KE33,3	216,72		

5.3. Yanma Hızı Test Sonuçları

Yalıtım malzemelerinde aranan bir diğer özellik alev dayanımıdır. Kompozit malzeme sentezinde yanıcılığı yüksek kenevir lifinin kimyasal yüzey geliştirme işlemleri yapılmış ve matris malzemesi olarak da epoksi reçine kullanılmıştır. Alev dayanımını artırmak için sağlığa zararsız olan Amonyum Polifosfat (APP) ağırlıkça %8 oranında kullanılarak alev dayanımının iyileştirilmesi amaçlanmıştır (Boccarusso vd., 2016). Ağırlıkça %10 kenevir elyaf takviyeli kompozit ile ağırlıkça %10 kenevir elyaf ve APP takviyeli matris malzemesinden 350x100x13mm ölçülerinde 2 adet kompozit malzeme hazırlanmış ve APP'nin etkinliği incelenmiştir. APP takviyeli kompozit malzeme yatay yanma işlemiyle test edilmiş ve başlatılan alev alma süreci 160 saniye sonra alevin yayılmasına karşı bir bariyer oluşturmuştur ve alev sönmüştür.

5.3.1. Kenevir elyaf ve epoksi reçine matrisli malzeme

Yanma Hızı = (Yanma Mesafesi / Yanma Süresi) x 60 (mm/dk)

Yanma mesafesi = 57, 102, 142 (mm)

Yanma süresi = 130, 220, 264 (sn)

Yanma hızı sırasıyla = 26, 28, 32 (mm/dk)

Ortalama yanma hızı = 29 (mm/dk)

5.3.2. Kenevir elyaf ve APP takviyeli epoksi reçine matrisli malzeme

Yanma Hızı = (Yanma Mesafesi / Yanma Süresi) x 60 (mm/dk)

Yanma mesafesi = 42mm

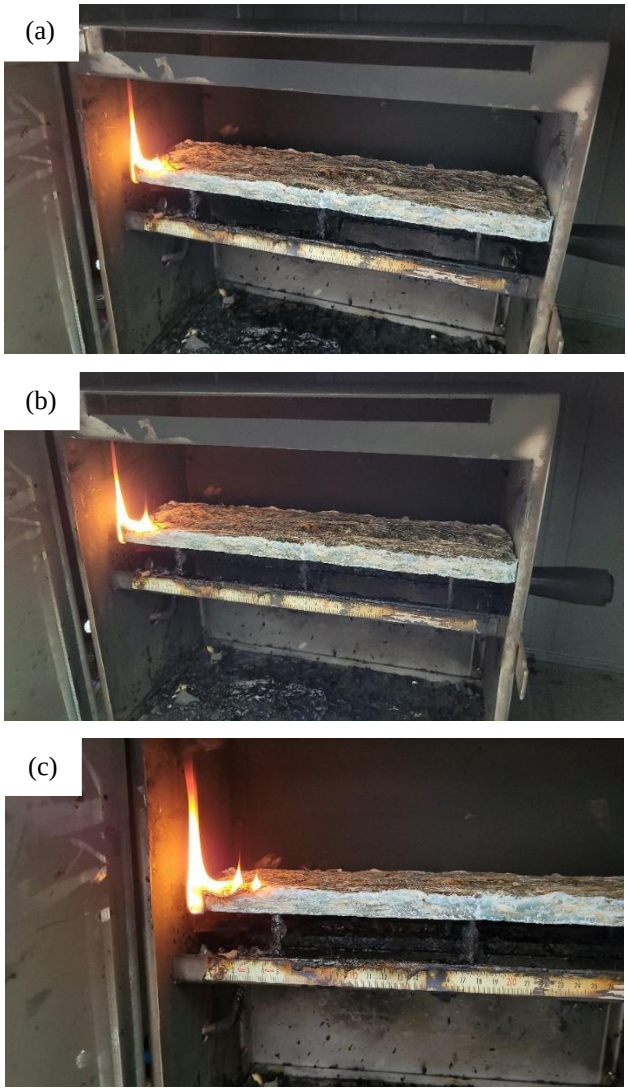
Yanma süresi = 160 sn

Yanma hızı = 16 mm/dk

Alev dayanım testlerinin sonuçları ile kompozit malzemede oluşan tahribat ve buna bağlı aleve karşı direnci göstermek adına Şekil (5.9 - 5.12) aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.9. Alev dayanım testlerinin sonucunda kompozit malzemelerde oluşan tahribat ve alev direnci.



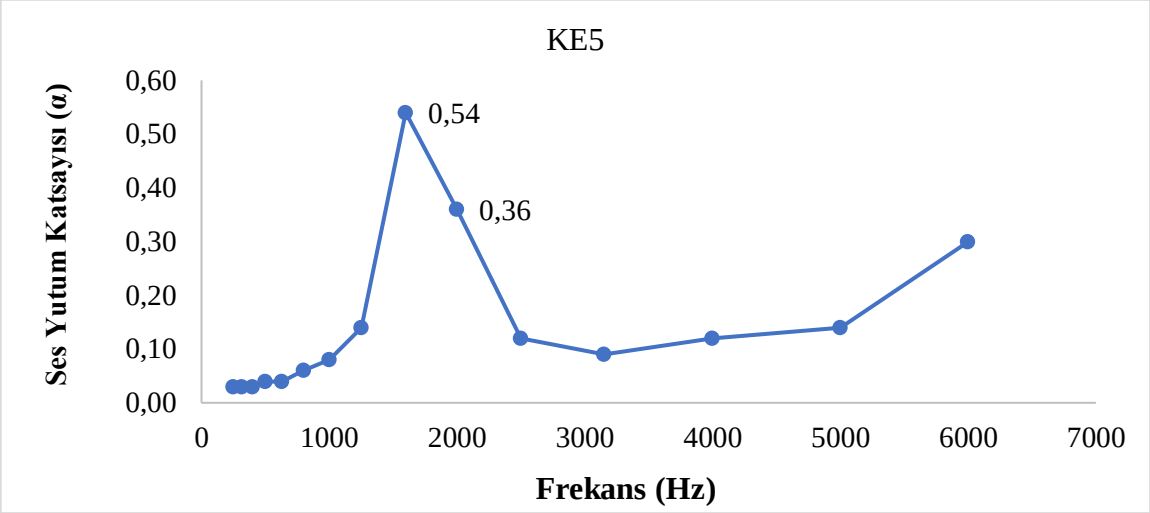
Şekil 5.10. APP katkısız kenevir lif takviyeli epoksi kompozit (a) Yanma hızı test süreci-1
(b) Yanma hızı test süreci-2
(c) Yanma hızı test süreci-3

5.4. Ses Yutum Katsayısı

Farklı lif içeriklerine sahip çapı 29mm kalınlığı 30mm olan kompozit malzemelerin ses yutum katsayıları empedans tüpü ile ölçülmüştür. Farklı % kenevir liflerine ve alev geciktirici özelliklerine cihazdan elde edilen frekans ve 1/3 oktav bandı ses yutum kastsayıları verileri Çizelge 5.9'da verilmektedir. Frekansa karşı 1/3 oktav bandı ses yutum katsayı verileri kullanılarak Şekil (5.11-5.14) elde edilmiştir. Şekil 5.15'de farklı yüzde kenevir lif içerikli kompozit malzemelerinin karşılaştırmalı olarak ses yutum katsayısı grafikleri verilmiştir.

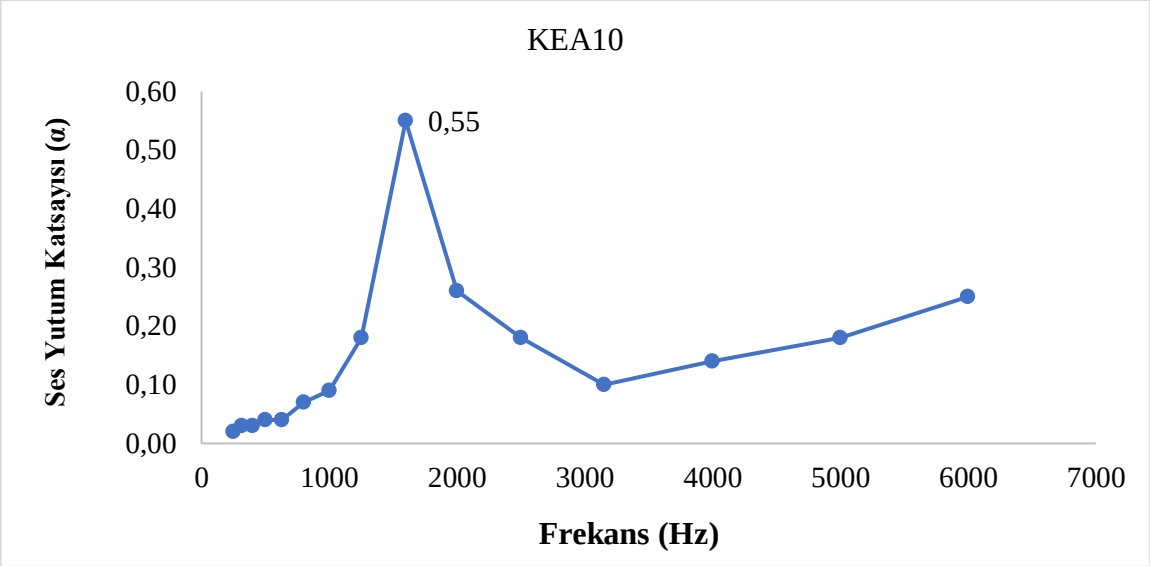
Çizelge 5.9. Farklı lif içeriklerine sahip kompozit malzemelerinin ses yutum katsayıları.

	Ses Yutum Katsayıları (J/J)			
Frekans (Hz)	**KE5**	**KE10**	**KE20**	**KEA10**
250	0,03	0,03	0,03	0,02
315	0,03	0,03	0,03	0,03
400	0,03	0,03	0,04	0,03
500	0,04	0,04	0,05	0,04
630	0,04	0,04	0,06	0,04
800	0,06	0,07	0,10	0,07
1000	0,08	0,09	0,17	0,09
1250	0,14	0,17	0,38	0,18
1600	0,54	0,54	0,41	0,55
2000	0,36	0,42	0,20	0,26
2500	0,12	0,18	0,13	0,18
3150	0,09	0,11	0,15	0,10
4000	0,12	0,15	0,29	0,14
5000	0,14	0,18	0,18	0,18
6000	0,30	0,40	0,30	0,25



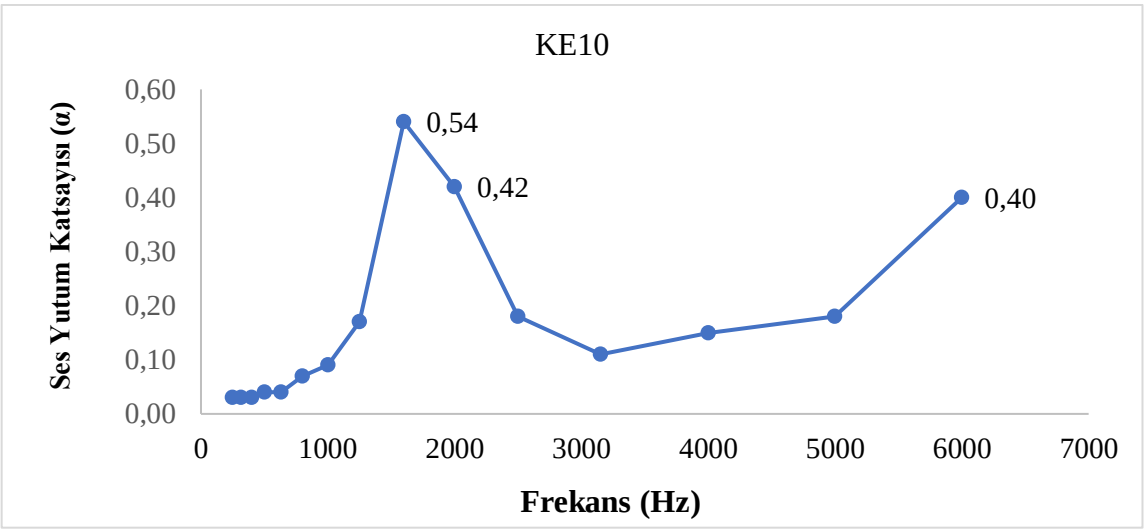
Şekil 5.11. KE5 epoksi kompozit malzemesinin frekansa karşı ses yutum katsayısı.

KE5 kompozit malzemesinin ses yutum katsayısı 1250 Hertz frekanstan hemen sonra 1600 Hertz frekansında 0,54 ile en yüksek ses yutum katsayısı değerine ulaşmıştır. 1600 Hertz frekansta en yüksek değer olan 0,54'ü gördükten sonra düşüşe başlamış 2000 Hertz frekansta 0,36 ile kısmen ses yutum özelliği gösteren kompozit malzememiz 2000 Hertzden 6000 Hertze kadar gelen ses enerjisini yutma özelliğini yerine getirememiştir. Değişen frekans değeriyle 6000 Hertzde yükselmeye başlasa da tüm frekans değerlerinde ses yutum katsayısı özelliği açısından yeterli verimi verememiştir.



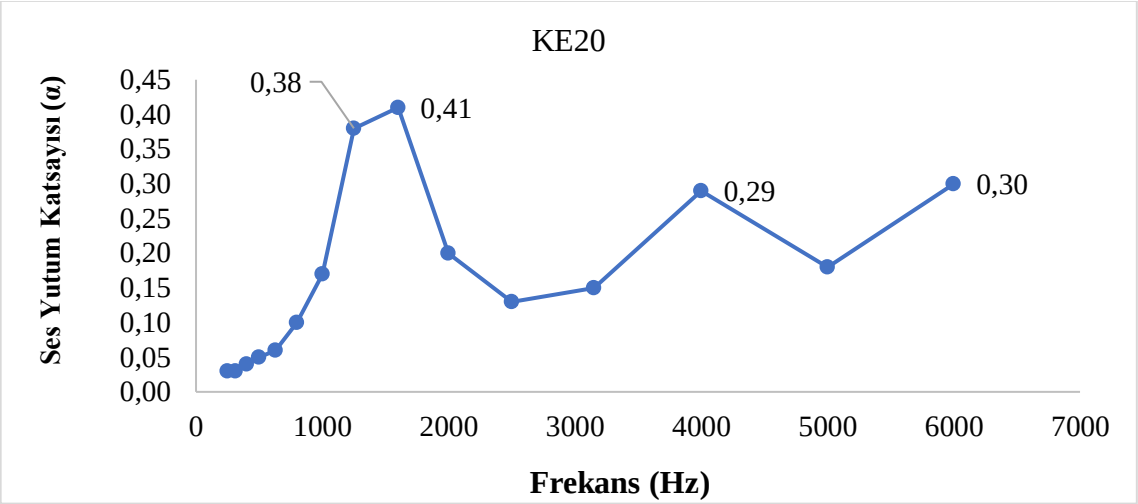
Şekil 5.12. KEA10 epoksi malzemesinin frekansa karşı ses yutum katsayısı.

KEA10 kompozit malzemesinde ses yutum katsayısı 1600 Hertz frekansında 0,55 ile 1'e en yakın sonucu vermiştir. 1600 Hertz frekans değerinden 2000 Hertz frekans değerine çıkıldığında ses yutum katsayısının 0,26'ya düştüğü belirlenmiştir. KEA10 kompozit malzemesinde tüm frekans değerlerinde ses yutum açısından verimli sonuçlar elde edilememiştir.



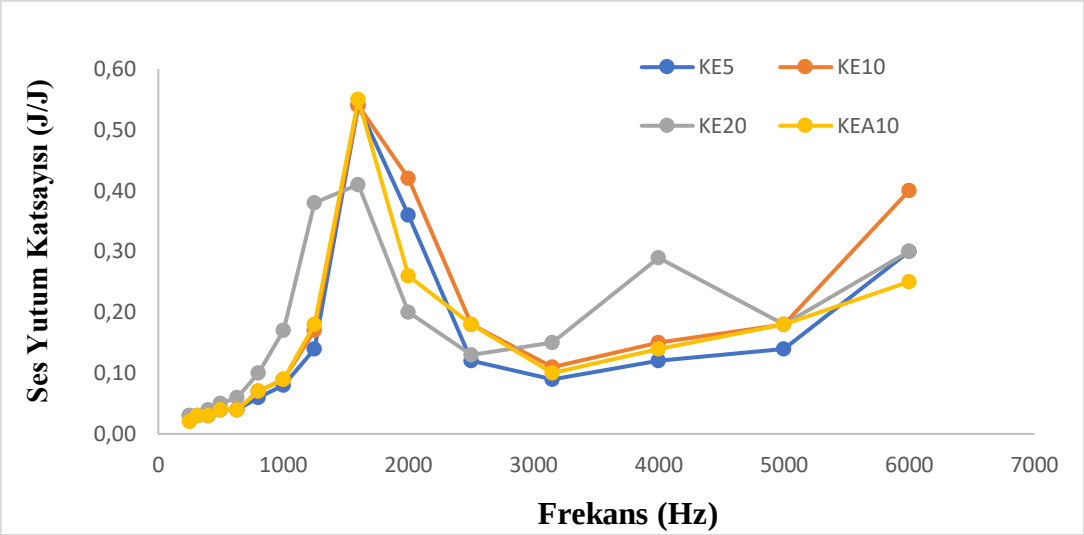
Şekil 5.13. KE10 epoksi malzemesinin frekansa karşı ses yutum katsayısı.

KE10 kompozit malzemesinin ses yutum katsayısı 1600 Hertz frekansında 0,54 ile en yüksek ses yutum katsayısını vermiştir. 2000 Hertz frekans değerinde 0,42 ile kısmen etkili olmuş 2500 Hertz frekans değerinde gelen ses enerjisini absorbe edememiştir. 6300 Hertz frekansında ses yutum katsayısı 0,40 ile %40'lık bir etkinlik göstermiş olsa da en iyi sonucu alabilmek için ses yutum katsayısının 1 değerine çok yakın olması gerekmektedir. Bu sebeple KE10 kompozit malzemesi tüm frekans değerlerinde etkin olmamıştır.



Şekil 5.14. KE20 epoksi kompozit malzemesinin frekansa karşı ses yutum katsayısı.

KE20 kompozit malzemesinin ses yutum katsayısı testinde en verimli sonuç 1600 Hertz frekans değerindeki 0,41'dir. 1250 Hertzde 0,38 ile ses yutum özelliğinin daha etkin olmaya başladığı fakat 1600 Hertzden 4000 ve 6000 Hertz frekans değerlerinde yaklaşık %30 ses yutum özelliği göstermiş ve diğer frekanslarda gelen enerjiyi absorbe edememiştir.



Şekil 5.15. Ağırlıkça farklı yüzdelerde kenevir lif takviyeli kompozit malzemelerinin ses yutum katsayıları.

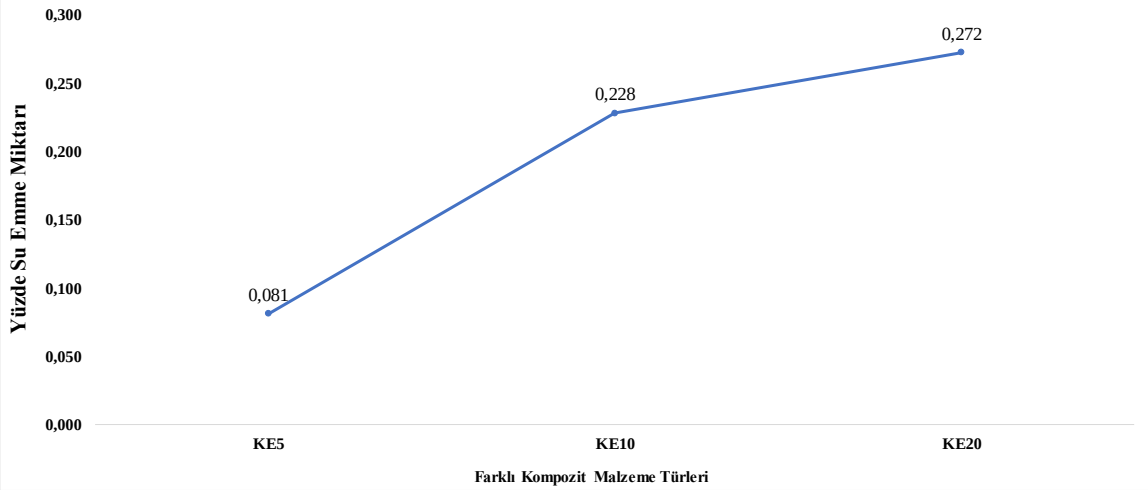
Ağırlıkça farklı lif miktarına ait epoksi esaslı kenevir lif ile güçlendirilmiş kompozit malzemenin ses yutum katsayılarında en iyi sonuçları KE5, KE10 ve KEA10 malzemeleri ~ 0,54 ses yutum katsayısı ile 1600Hz frekansta vermiştir. 1000Hz frekansa kadar teste tabi tutulan tüm numuneler ses yutum özelliği göstermemiştir. En etkin ses yutum katsayısını 1600Hz frekans değerinde verdikten sonra ses yutum katsayısı düşmeye başlamış ve yüksek frekans değerlerine gittikçe etkinliğini gösterememiştir. Fernea vd.' nin elde ettiği ses yutum katsayıları ve bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.10'da verilmiştir.

Çizelge 5.10. Kenevir lif takviyeli kompozitlerin ses yutum katsayılarının karşılaştırılması.

Ses Yutum Katsayıları, (α), (J/J)					**Referans**
Numuneler					
Frekans (Hz)	**KE5**	**KE10**	**KE20**	**KEA10**	**Bu Çalışma**
1600	0,54	0,54	0,41	0,55	
2000	0,36	0,42	0,20	0,26	
6000	0,30	0,40	0,30	0,25	
	R1	**R2**	**R3**	**R4**	**Fernea vd., (2019)**
500	—	—	0,90	0,90	
1000	~ 0,8	—	—	—	
1500	~ 0,52	0,90	~ 0,56	~ 0,65	
2000	0,45	~ 0,70	0,50	0,60	
2500	—	0,65	—	—	
6000	~ 0,67	~ 0,80	~ 0,70	~ 0,75	
R1 : Tek katmanlı kenevir sapları R2 : Tek katmanlı kenevir lifleri R3 : Çok katmanlı (kenevir sapları-kenevir lifleri-kenevir sapları) R4 : Çok katmanlı (kenevir lifleri-kenevir sapları-kenevir lifleri)					

5.5. Vakumlu Su Emme

Vakum altında su emme yüzdesini belirlemek üzere Devotrans markalı test cihazı kullanılmıştır. ASTM D 1056 standartlarına göre gerçekleştirilen vakum altında su emme testi için üretilen kompozit malzemelerinin (KE5, KE10 ve KE20) her birinin boyutu 50x50mm olarak hazırlanmıştır. Su emme testi 3 dakika süre ile 17 kPa vakum basıncı altında gerçekleştirilmiştir. KE5, KE10 ve KE20 kompozit malzemeleri için yüzde su emme değerleri Şekil 5.16'da verilmiştir.



Şekil 5.16. KE5, KE10 ve KE20 kompozit malzemelerinin yüzde su emme değerleri. (t=3dk, P=17 kPa vakum basıncı).

KE5, KE10 ve KE20 kompozit malzemelerine vakum altında su emme testi 17 kPa vakum basıncı altında gerçekleşmiştir. Kenevir lifleri oldukça hidrofilik yapıdadır. Kenevir lif takviyesindeki artışla beraber kompozit malzemeler tarafından tutulan su miktarında artış olduğu belirlenmiştir. Çok yüksek lif içeriklerinde su emmedeki artış yenilenebilir kompozit malzemelerin kullanımını %25'lik lif kullanımı ile sınırlandırmaktadır. Sair vd., (2018) poliüretan ve kenevir lifi ile 40x40x20 mm boyutlarındaki kompozit malzemelerin su emme testlerini gerçekleştirmiştir. Sair vd.' nin elde ettiği su emme test sonuçları ile bu tez çalışmasında vakumlu su emme testi ile elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.11'de verilmiştir (Sair vd., 2018).

Çizelge 5.11. Kenevir lif takviyeli kompozitlerin su emme yüzdelerinin karşılaştırılması.

Fiber İçeriği (%)	Su Emme Yüzdesi (%W)	**Referans**
PU	15,70	**Sair vd. (2018)**
PU %5	29,98	
PU %10	31,15	
PU %15	38,42	
PU %20	40,06	
PU %25	43,87	
PU %30	64,25	
KE5	0,081	**Bu Çalışma**
KE10	0,228	
KE20	0,272	

5.6. Isı İletim Katsayısı

Isı iletim katsayısı için KE5, KE10, KEA10, KE20 ve KE33,3 kompozit malzemeleri teste tabii tutulmuştur. Sentetik bazlı ısı yalıtım malzemelerinin yerine yenilenebilir, ucuz ve kolay yetiştiriciliğiyle ön plana çıkan aynı zamanda devlet tarafından üretim ve bilim için kullanımı desteklenen kenevir lifi kullanılmıştır. Sentezlenen kompozit malzemelerin ısı iletim katsayıları C-Therm Termal İletkenlik Test cihazı (Şekil 5.17) ile belirlenmiştir. Isı iletim katsayıları; silindirik 30mm çapında ve 30mm kalınlığında KE10 kompozit malzemesi için Çizelge 5.12 - Şekil 5.18'de ve 40x40x40 mm boyutlarında KE5, KE10, KEA10, KE20 ve KE33,3 kompozit malzemesi için Çizelge 5.13 - Şekil (5.19-5.24)'de verilmektedir.

Hung Anh ve Pásztory'e göre, (2021), ısı iletim katsayı değeri 0,1W/mK'den fazla ise bu malzeme ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılamayacağını ifade etmiştir.



Şekil 5.17. Isı iletkenlik katsayısının test edildiği termal iletkenlik test ciharı C-Therm

Çizelge 5.12. KE10 kompozit malzemesinin ısı iletim katsayısı analiz verileri **(a)** 1.numune **(b)** 2.numune

(a)	Sensör	Durum	Efüsivite (Ws½/m²K)	k (W/mK)	1/m	R2	Başlangıç	V0 (mV)	VMax (mV)	ΔV (mV)	Oda Sıcaklığı (°C)	ΔT (°C)
1	H525	Geçerli	759,515	0,387	28,274	1,000	10.08.2021 04:50	4919,5	4943,6	24,1	24,0	1,4
2	H525	Geçerli	756,538	0,385	28,206	1,000	10.08.2021 04:51	4916,4	4940,6	24,2	23,7	1,4
3	H525	Geçerli	753,311	0,381	28,137	1,000	10.08.2021 04:52	4914,3	4938,5	24,2	23,5	1,5
4	H525	Geçerli	754,471	0,383	28,149	1,000	10.08.2021 04:53	4912,2	4936,4	24,2	23,4	1,4
5	H525	Geçerli	751,815	0,380	28,095	1,000	10.08.2021 04:55	4910,7	4935,0	24,2	23,2	1,4
(b)	Sensör	Durum	Efüsivite (Ws½/m²K)	k (W/mK)	1/m	R2	Başlangıç	V0 (mV)	VMax (mV)	ΔV (mV)	Oda Sıcaklığı (°C)	ΔT (°C)
1	H525	Geçerli	761,137	0,389	28,346	1,000	10.08.2021 04:57	4927,5	4951,4	23,9	24,8	1,4
2	H525	Geçerli	751,383	0,380	28,137	1,000	10.08.2021 04:58	4920,7	4944,7	24,0	24,1	1,4
3	H525	Geçerli	748,245	0,376	28,061	1,000	10.08.2021 04:59	4916,7	4940,7	24,1	23,8	1,4
4	H525	Geçerli	751,846	0,380	28,110	1,000	10.08.2021 05:00	4913,6	4937,7	24,1	23,5	1,4
5	H525	Geçerli	749,313	0,377	28,054	1,000	10.08.2021 05:01	4911,1	4935,2	24,1	23,3	1,4

Burada;

Effusivity (Ws½/m²K); Effusivity metodun kalbirasyonu ile cihaz tarafından ölçülmüş değeri,

K (W/mK); Termal iletkenlik metodunun kalibrasyonu ile cihaz tarafından ölçülmüş değeri,

Başlangıç; Her bir ölçüm için başlangıç zamanı,

R2; V-Vt eğrisinin her bir ölçüm için ne kadar düz olduğunu gösterir,

V0 (mV); Her bir ölçüm için başlangıç voltajı,

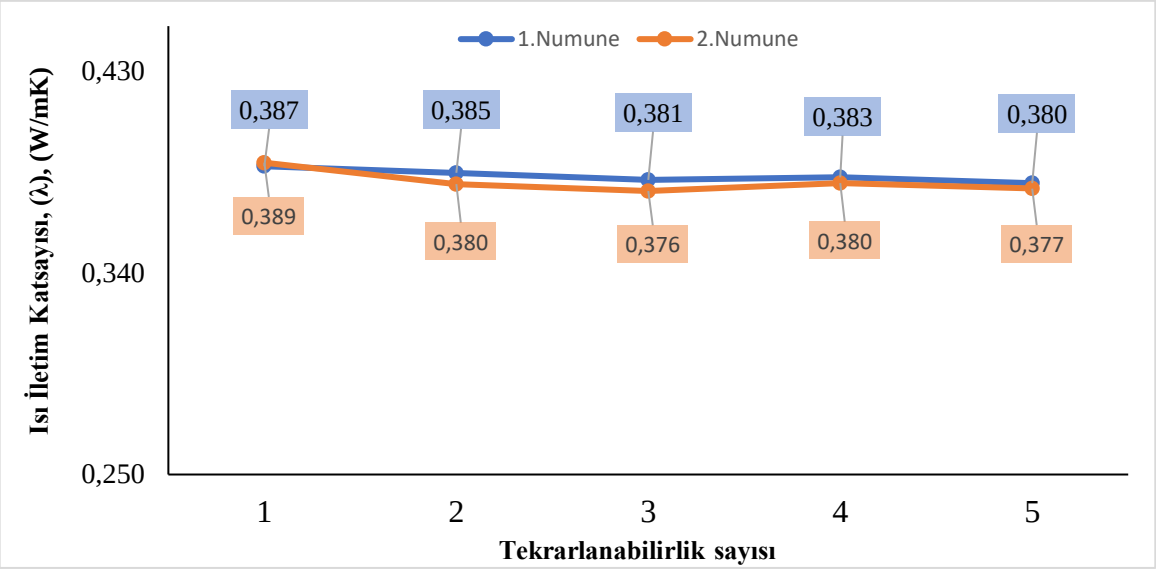
VMax (mV); Her bir ölçüm için maksimum voltaj,

ΔV (mV); Her bir ölçüm için başlangıç ve bitiş arasındaki fark,

Oda sıcaklığı (°C); Her bir ölçüm için oda sıcaklığı,

T0 (°C); Her bir ölçüm için başlangıç sıcaklığı,

ΔT (°C); Ölçüm arasında sensör yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimi.



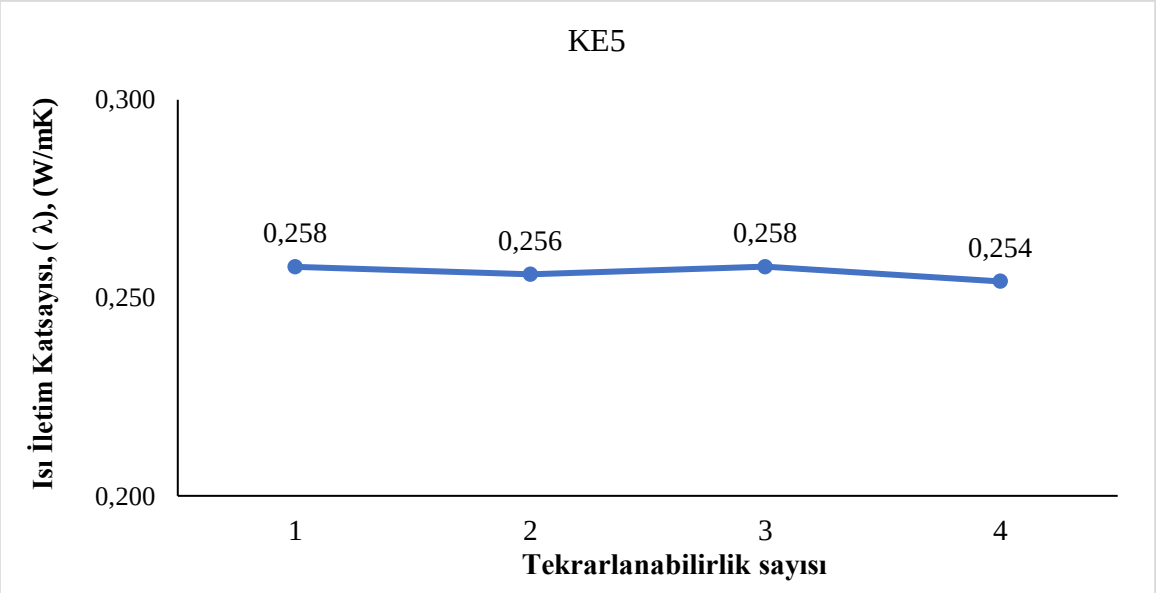
Şekil 5.18. KE10 kompozit malzemesine ait zamana karşı ısı iletim katsayıları.

KE10 kompozit malzemesi için termal iletkenlik testi gerçekleştirilmiştir ve sonuç olarak ısı iletim katsayısı değerini en düşük olarak 0,376W/mK değeri cihaz tarafından analiz sonuçlarında verilmiştir. Bu sonuca göre sentezi gerçekleştirilmiş KE10 kodlu kompozit malzemesi ısı yalıtım özelliği göstermemiştir.

Çizelge 5.13. KE5, KE10, KEA10, KE20, KE33,3 kompozitlerinin ısı iletim katsayısı analiz verileri.

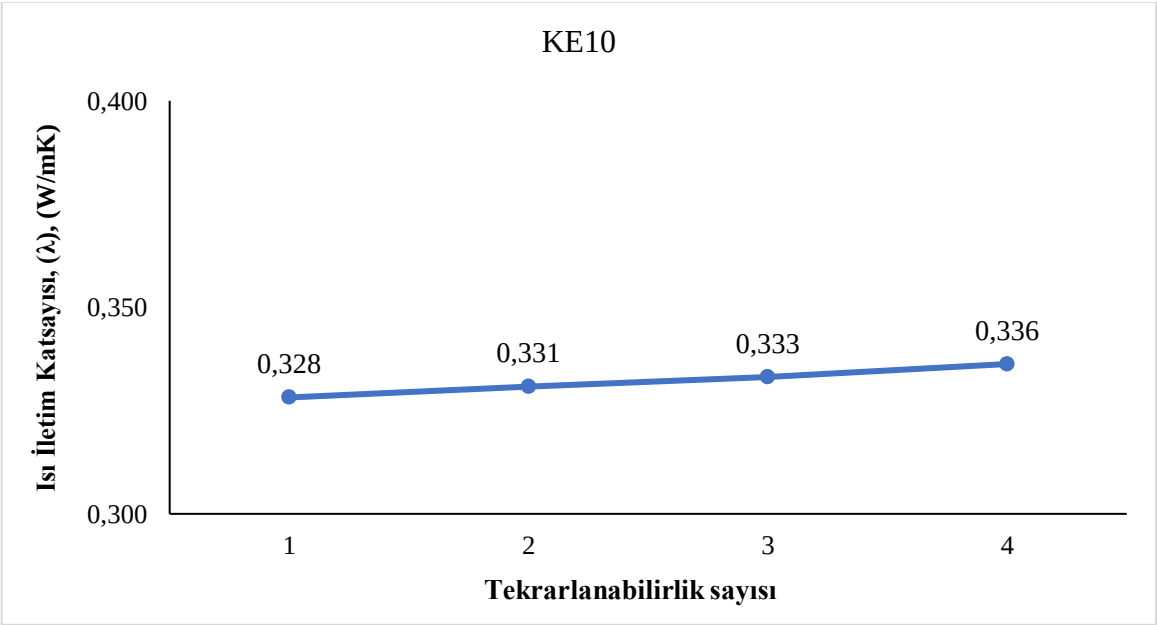
KE5	Sensör	Durum	Efüsivite (Ws½/m²K)	k (W/mK)	1/m	R2	Başlangıç	V0 (mV)	VMax (mV)	ΔV (mV)	Oda Sıcaklığı (°C)	ΔT (°C)
1	H525	Geçerli	624,934	0,258	25,951	1,000	3.09.2021 05:15	4929,4	4955,1	25,7	24,8	1,5
2	H525	Geçerli	622,947	0,256	25,911	1,000	3.09.2021 05:16	4928,4	4954,1	25,7	24,7	1,5
3	H525	Geçerli	624,947	0,258	25,946	1,000	3.09.2021 05:18	4927,9	4953,6	25,7	24,7	1,5
4	H525	Geçerli	620,991	0,254	25,876	1,000	3.09.2021 05:19	4927,2	4953,0	25,8	24,7	1,5
KE10	Sensör	Durum	Efüsivite (Ws½/m²K)	k (W/mK)	1/m	R2	Başlangıç	V0 (mV)	VMax (mV)	ΔV (mV)	Oda Sıcaklığı (°C)	ΔT (°C)
1	H525	Geçerli	698,542	0,328	27,279	1,000	3.09.2021 04:51	4936,2	4960,7	24,5	25,4	1,5
2	H525	Geçerli	701,291	0,331	27,324	1,000	3.09.2021 04:52	4936,0	4960,5	24,5	25,4	1,5
3	H525	Geçerli	703,670	0,333	27,365	1,000	3.09.2021 04:54	4935,3	4959,7	24,4	25,4	1,5
4	H525	Geçerli	706,924	0,336	27,419	0,999	3.09.2021 04:55	4935,3	4959,7	24,4	25,3	1,5
KEA10	Sensör	Durum	Efüsivite (Ws½/m²K)	k (W/mK)	1/m	R2	Başlangıç	V0 (mV)	VMax (mV)	ΔV (mV)	Oda Sıcaklığı (°C)	ΔT (°C)
1	H525	Geçerli	676,891	0,307	26,896	1,000	3.09.2021 04:57	4936,2	4961,1	24,9	25,4	1,5
2	H525	Geçerli	679,002	0,309	26,929	1,000	3.09.2021 04:58	4935,2	4960,1	24,9	25,3	1,5
3	H525	Geçerli	679,965	0,310	26,942	1,000	3.09.2021 04:59	4935,0	4959,8	24,9	25,2	1,5
4	H525	Geçerli	679,453	0,310	26,928	1,000	3.09.2021 05:00	4934,1	4959,0	24,9	25,1	1,5
KE20	Sensör	Durum	Efüsivite (Ws½/m²K)	k (W/mK)	1/m	R2	Başlangıç	V0 (mV)	VMax (mV)	ΔV (mV)	Oda Sıcaklığı (°C)	ΔT (°C)
1	H525	Geçerli	625,546	0,258	25,965	0,999	3.09.2021 05:04	4930,5	4956,1	25,6	24,8	1,5
2	H525	Geçerli	627,593	0,260	25,995	0,999	3.09.2021 05:05	4928,9	4954,5	25,6	24,7	1,5
3	H525	Geçerli	627,644	0,260	25,987	1,000	3.09.2021 05:06	4927,3	4952,9	25,6	24,6	1,5
4	H525	Geçerli	629,538	0,262	26,015	0,999	3.09.2021 05:07	4925,8	4951,4	25,6	24,5	1,5
KE33,3	Sensör	Durum	Efüsivite (Ws½/m²K)	k (W/mK)	1/m	R2	Başlangıç	V0 (mV)	VMax (mV)	ΔV (mV)	Oda Sıcaklığı (°C)	ΔT (°C)
1	H525	Geçerli	728,947	0,358	27,760	1,000	3.09.2021 05:09	4925,7	4949,9	24,2	24,5	1,4
2	H525	Geçerli	729,926	0,359	27,770	1,000	3.09.2021 05:11	4924,2	4948,3	24,2	24,3	1,4
3	H525	Geçerli	729,240	0,358	27,753	1,000	3.09.2021 05:12	4923,3	4947,4	24,2	24,2	1,4
4	H525	Geçerli	730,118	0,359	27,769	1,000	3.09.2021 05:13	4923,0	4947,2	24,2	24,2	1,4

KE5, KE10, KEA10, KE20 ve KE33,3 kompozitleri için termal iletkenlik testleri ile ısı iletim katsayıları test cihazı C-Therm aracılığıyla elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda Çizelge 5.13 incelendiğinde herhangi bir ölçümde 0,1 W/mK değerinden daha düşük bir ısı iletim katsayısı elde edilememiştir. Buna göre termal iletkenlik testi gerçekleştirilen tüm kompozit malzemeler için ısı yalıtım özelliği açısından verimli bir sonuç elde edilememiştir.



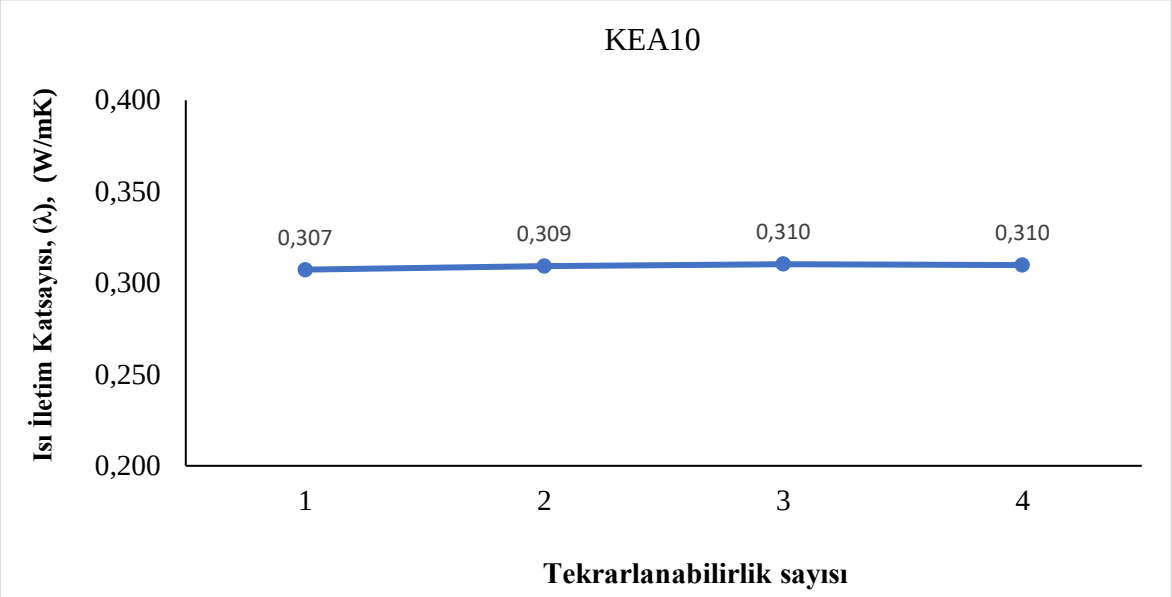
Şekil 5.19. KE5 kompozitin ısı iletim katsayısı için tekrarlanabilirlik test sonuçları.

KE5 kompozit malzemesinin 4 tekrarlanabilirlik sonuçlarına göre ısı iletim katsayısı ortalama olarak 0,256 W/mK değeri ile C-Therm termal iletkenlik test cihazı tarafından elde edilmiştir.



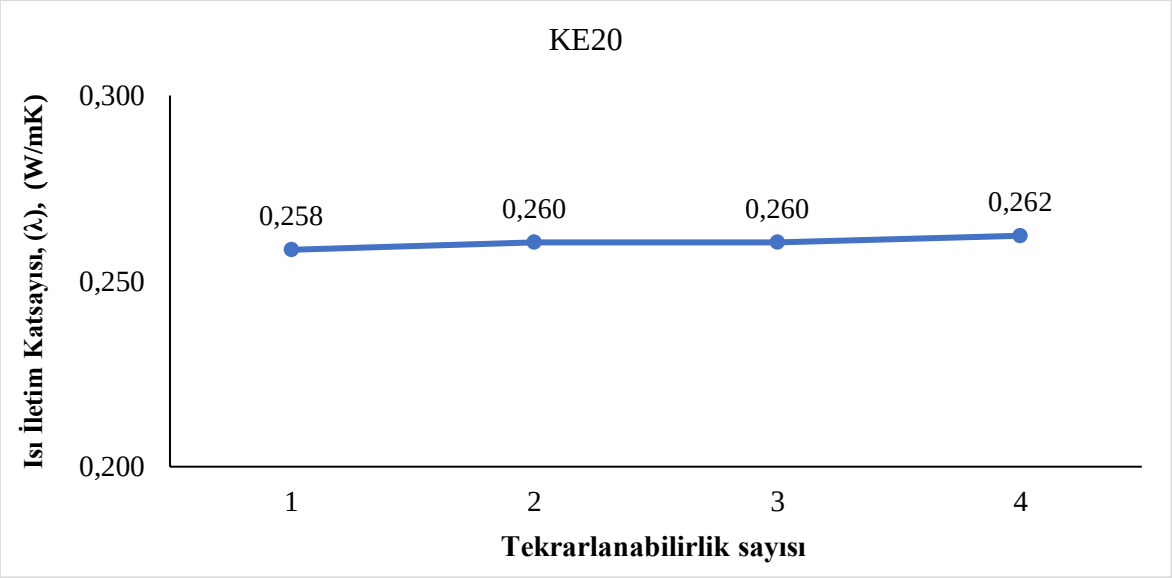
Şekil 5.20. KE10 kompozitinin her bir ölçümü için ısı iletim katsayısı.

KE10 kompozit malzemesinin ısı iletim katsayısının belirlenmesinde toplamda 4 kez test tekrarı yapılmış ve en iyi sonucu ilk ölçüm 0,328 W/mK değeri ile elde edilmiştir.



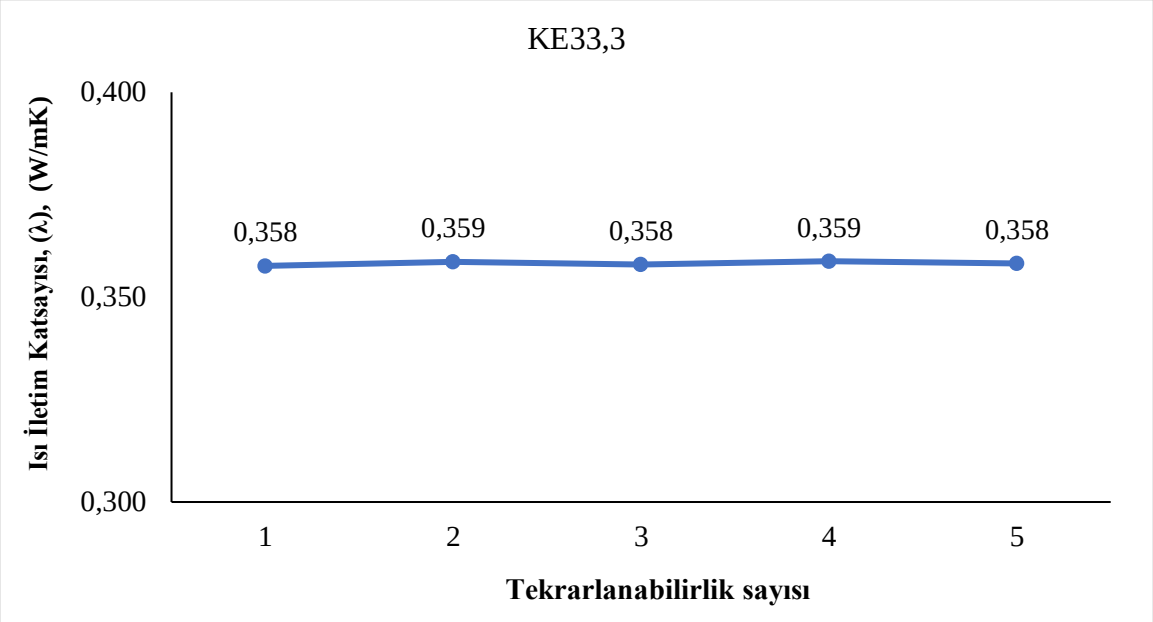
Şekil 5.21. KEA10 kompozitinin her bir ölçümü için ısı iletim katsayısı.

KEA10 kompozit malzemesinin ısı iletim katsayısının belirlenmesinde toplamda 4 kez test tekrarı yapılmış ve en iyi sonucu ilk ölçüm 0,307 W/mK değeri ile elde edilmiştir.



Şekil 5.22. KE20 kompozitinin her bir ölçümü için ısı iletim katsayısı.

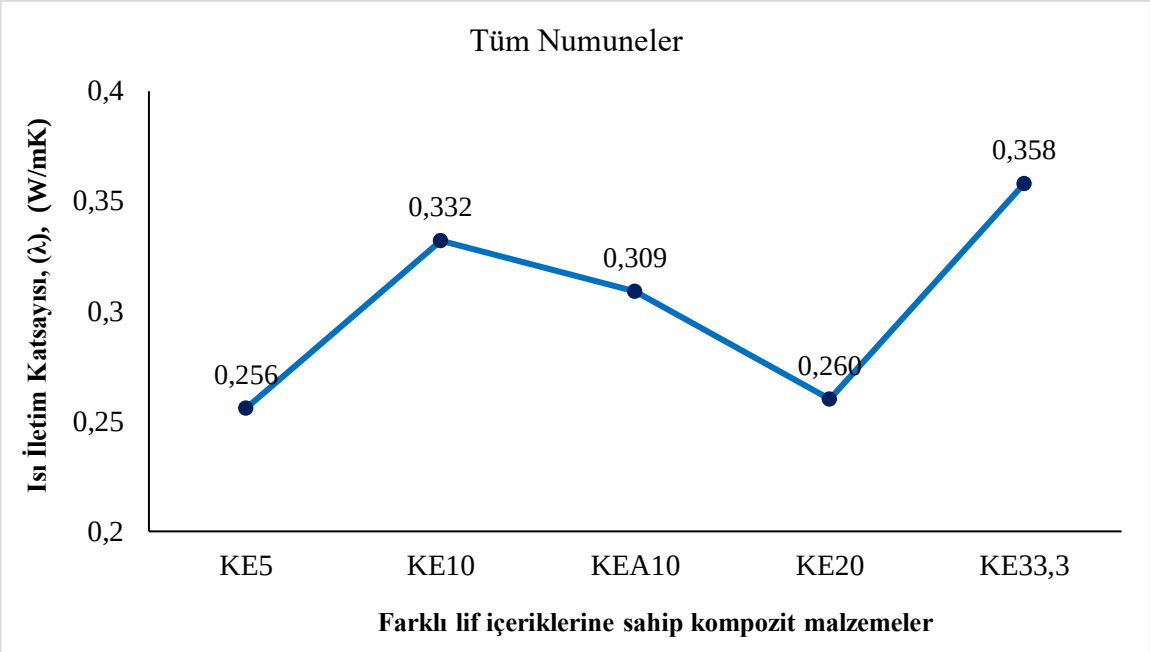
KE20 kompozit malzemesinin ısı iletim katsayısının belirlenmesinde toplamda 4 kez test tekrarı yapılmış ve en iyi sonucu ilk ölçüm 0,258 W/mK değeri ile elde edilmiştir.



Şekil 5.23. KE33,3 kompozitinin her bir ölçümü için ısı iletim katsayısı.

KE33,3 kompozit malzemesinin ısı iletim katsayısının belirlenmesinde toplamda 4 kez test tekrarı yapılmış ve en iyi sonucu birinci ve üçüncü ölçümde 0,358 W/mK değeri ile elde edilmiştir.

Sentezlenen farklı lif içerikli kompozit malzemelerin ortalama ısı iletim katsayıları Şekil 5.24'de gösterilmektedir.



Şekil 5.24. Sentezlenen farklı lif içerikli kompozit malzemelerin ısı iletim katsayıları.

Şekil 5.24'de görüldüğü gibi 0.1 W/mK değerine en yakın KE5 kompozit malzemesi olmuştur (0,256 W/mK). Elde edilen bu değerler sentezlenen malzemelerin ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılamayacağını göstermektedir.

Termal iletkenlik yoğunlukla doğrudan ilgilidir. Fernea vd., (2019)'ne göre en hafif kompozit malzeme bileşiminde ısı iletim katsayısı 0,061 W/mK iken en ağır kompozit malzeme bileşiminde 0,1 W/mK ısı iletim katsayı değerine ulaşmışlardır. Isıl iletkenlik değeri artarsa, numunenin ısıl performansları daha düşük olacaktır. Çizelge 5.14'te yoğunluk ve ısı iletim katsayılarının bulunduğu tek katmanlı ve çok katmanlı kompozit malzemelerin test sonuçları ile bu çalışmada yapılan testlerin sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu sonuçlara göre yoğunluk farkından kaynaklanan ısı iletim katsayılarını gözlemlemek de mümkündür. Yapılan bu çalışmaya göre üretim operatörünün el becerisinin ön planda olduğu elle yatırma metodu ile üretilen kompozit malzemelerinin homojen yapıda olmamaları sebebiyle yoğunluk ve ısı iletim katsayısı arasındaki ilişkiyi gözlemlemek güçleşmiştir. Bu doğrultuda Çizelge 5.14'de verildiği üzere sentezlenen malzemelerin ısı iletim katsayılarının 0,1 W/mK değerinden düşük olmadığı görülmektedir (Fernea vd., 2019).

Çizelge 5.14. Kenevir lif takviyeli kompozitlerin yoğunluk ve ısı iletim katsayı özelliklerinin karşılaştırılması.

Kompozit Malzeme Kodu	Yoğunluk (ρ, kg/m^3)	Isı İletim Katsayısı (λ, W/mK)	Referans
R1	600	0,106	**Fernea vd., (2019)**
R2	410	0,061	
R3	610	0,097	
R4	505	0,078	
KE5	1137	0,256	**Bu Çalışma**
KE10	1122	0,332	
KEA10	1146	0,309	
KE20	1398	0,260	
KE33,3	936	0,358	

5.7. Yoğunluk Tayini

Ağırlıkça %5, 10, 20 ve 33,3 kenevir lif takviyeli malzemelerin yoğunlukları aşağıda sırası ile verilmiştir. Kompozit malzeme ile ağırlıkça %10 kenevir lif + %8 APP içerikli kompozit malzemenin yoğunluğu ise ρ_{KEA10} = 1146 kg/m^3 olarak hesaplanmıştır.

ρ_{KE5} = 1137 kg/m^3

ρ_{KE10} = 1122 kg/m^3

ρ_{KE20} = 1398 kg/m^3

$\rho_{KE33,3}$ = 936 kg/m^3.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ağırlıkça farklı yüzdelerde kenevir elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemeleri sentezlenmiştir. Sentezlenen malzemelere; eğilme dayanımı, basınç dayanımı, yanma dayanımı, ses yutum katsayısı, vakum altında su emme yüzdesi ve ısı iletim katsayı testleri uygulanmıştır. Yapılan testlere göre;

- Eğilme dayanımında en iyi sonucu %20 kenevir elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemesi 59,1 N/mm^2 olarak vermiştir.

- Basınç dayanımında en iyi sonucu %33,3 kenevir elyaf takviyeli epoksi kompozit numunesi oldukça yüksek bir değer olan 216.72 N/mm^2 ile vermiştir. Oldukça hafif bir malzeme olmasının yanı sıra basınç değerinin de yüksek olması malzemenin basınç dayanımının iyi olduğunu göstermektedir.

- Yanma dayanımı için alev geciktirici özellikler vermek amacıyla Amonyum Polifosfat kullanılmıştır. Yatay yanma hız testi sonucunda APP katkılı kompozit malzemenin istenilen şekilde tepki vererek yangına karşı dirençli ve yangını durdurma özelliği göstermiştir.

- 1600 Hertz frekansında ses yutum katsayısı testi sonuçlarına göre KE5, KE10 ve KEA10 kompozit malzemeleri ortalama 0,54 J/J değeri ile en iyi sonuçları vermiştir. Bu değer 1'e yakınlığına göre sentezlenen kompozit malzemelerinin ses yutum özelliğinin yaklaşık %50 etkinlik ile kullanılabilirliğini göstermektedir. Gelen ses enerjisinin kompozit malzeme tarafından tamamen yutulmadığını yani 1600 Hertz frekansında bile belirli bir miktarda sesi iletebildiği sonucuna varılabilir.

- Su emme sonuçlarına göre sentezlenen farklı kenevir lif içerikli kompozit malzemelerin lif miktarının artışıyla artan su emme özelliğinden dolayı yapı malzemelerinde kullanımının uygun olmayacağı söylenebilir.

- Termal iletkenlik test sonuçlarına göre sentezlenen farklı kenevir lif içerikli kompozit malzemelerden KE5 kompozit malzemesinin ısı iletkenlik katsayısı 0,256 W/mK değeri ile 0,1 W/mK' ne en yakın olan sonuçtur. Elde edilen bu değere göre sentezlenen kompozit malzemelerin ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirliğinin uygun olmadığını göstermektedir.

- Sentezlenen ağırlıkça farklı kenevir lif içerikli kompozit malzemelerin mekanik dayanım yönünden yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin uygun olacağı görülmektedir.

- Epoksi esaslı kenevir lif ile güçlendirilmiş kompozitler, kenevir liflerin epoksi reçine içine tamamen gömülü olmadan sentezlenmesi tavsiye edilir.

- Kompozit üretim metotlarından en ucuz fakat uygulama operatörünün el becerisi veyahut önceden bir deneyim sahibi olmaması, elle yatırma metoduna alternatiflerin de değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Acun, S. (2019). “Yapilarda yaygin kullanilan isi yalitim malzemelerġnġn performans özellġklerġnġn duvar kesġtlerġ üzerġnde değerlendġrġlmesġ”. 25–48.

Akin, D. E. (2003). “Flax Fiber”. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 11(3), 588–623.

Amode, N. S., ve Jeetah, P. (2021). “Paper Production from Mauritian Hemp Fibres”. *Waste and Biomass Valorization*, Springer Netherlands, 12(4), 1781–1802.

Arslan, M. A., ve Aktaş, M. (2018). “İnşaat Sektöründe Kullanılan Yalıtım Malzemelerinin Isı ve Ses Yalıtımı Açısından Değerlendirilmesi”. *Journal of Polytechnic*, 0900(2), 299–320.

Baetens, R., Jelle, B. P., ve Gustavsen, A. (2011). “Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review”. *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., 43(4), 761–769.

Balasubramanian, M. (2013). *Composite materials and processing*. *Composite Materials and Processing*.

BEKTAŞ, V., ÇERÇEVİK, A. E., ve KANDEMİR, S. Y. (2017). “Binalarda Isı Yalıtımının Önemi ve Isı Yalıtım Malzemesi Kalınlığının Yalıtım a Etkisi”. 7575, 36–42.

Boccarusso, L., Carrino, L., Durante, M., Formisano, A., Langella, A., ve Memola Capece Minutolo, F. (2016). “Hemp fabric/epoxy composites manufactured by infusion process: Improvement of fire properties promoted by ammonium polyphosphate”. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier Ltd, 89, 117–126.

BTÜ. (2016). *3 NOKTA EĞME DENEYİ FÖYÜ*. 1–7.

Bulut, Y., ve Erdoğan, Ü. H. (2011). “Usability of Cellulose Based Natural Fibers As Reinforcement Materials in Composite Manufacturing”. *The Journal of Textile and Engineers*, 82, 26–35.

Crini, G., ve Lichtfouse, E. (2012). *Sustainable Agriculture Reviews*. *Sustainable Agriculture Reviews*.

Crini, G., Lichtfouse, E., Chanet, G., ve Morin-Crini, N. (2020). "Applications of hemp in textiles, paper industry, insulation and building materials, horticulture, animal nutrition, food and beverages, nutraceuticals, cosmetics and hygiene, medicine, agrochemistry, energy production and environment: a review". *Environmental Chemistry Letters*, Springer International Publishing, 18(5), 1451–1476.

Dayo, A. Q., Gao, B. chang, Wang, J., Liu, W. bin, Derradji, M., Shah, A. H., ve Babar, A. A. (2017). "Natural hemp fiber reinforced polybenzoxazine composites: Curing behavior, mechanical and thermal properties". *Composites Science and Technology*, Elsevier Ltd, 144, 114–124.

Dayo, A. Q., Wang, A. ran, Kiran, S., Wang, J., Qureshi, K., Xu, Y. le, Zegaoui, A., Derradji, M., Babar, A. A., ve Liu, W. bin. (2018a). "Impacts of hemp fiber diameter on mechanical and water uptake properties of polybenzoxazine composites". *Industrial Crops and Products*, 111(2017), 277–284.

Dayo, A. Q., Zegaoui, A., Nizamani, A. A., Kiran, S., Wang, J., Derradji, M., Cai, W. an, ve Liu, W. bin. (2018b). "The influence of different chemical treatments on the hemp fiber/polybenzoxazine based green composites: Mechanical, thermal and water absorption properties". *Materials Chemistry and Physics*, Elsevier B.V., 217, 270–277.

DEÜ. (2021). *Çekme Deneyi*. 1–6.

Durakovic, B., Yildiz, G., ve Yahia, M. E. (2020). "Comparative performance evaluation of conventional and renewable thermal insulation materials used in building envelops". *Tehnicki Vjesnik*, 27(1), 283–289.

Durgun, İ., Vatansever, O., Ertan, R., ve Yavuz, N. (2014). "Otomotiv Sektöründe Kullanılan Kompozit Parça İmalat Yöntemlerinin Deneysel Olarak Karşılaştırılması". *Mühendis ve Makine*, 55(649), 58–63.

F.C.Campbell. (2004). "Thermoset Resins: The Glue That Holds the Strings Together". *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, 63–101.

F.L.Matthews, R. D. R. (1999). "Polymer Matrix Composites". *Composite Materials*, 168–205.

Fernea, R., Manea, D. L., Plesa, L., Iernutan, R., ve Dumitran, M. (2019). "Acoustic and

thermal properties of hemp-cement building materials". *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 32, 208–215.

Ferreira, D. P. (2019). *Surface modification of natural fibers in polymer composites*. *Green Composites for Automotive Applications*, Elsevier Ltd, Portugal.

Gencel, O., Del Coz Diaz, J. J., Sutcu, M., Koksal, F., Alvarez Rabanal, F. P., Martinez-Barrera, G., ve Brostow, W. (2014). "Properties of gypsum composites containing vermiculite and polypropylene fibers: Numerical and experimental results". *Energy and Buildings*, Elsevier B.V., 70, 135–144.

Horne, M. R. L. (2020). *Bast fibres: Hemp cultivation and production*. *Handbook of Natural Fibres: Second Edition*, Elsevier Ltd.

Hung Anh, L. D., ve Pásztory, Z. (2021). "An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials". *Journal of Building Engineering*, 44.

İZODER. (2013a). "Isı Yalıtımı". *İnşaat Teknolojisi*, 1–74.

İZODER. (2013b). "İnşaat Teknolojisi Su Yalıtımı". *İzoder*.

Jelle, B. P. (2011). "Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions - Properties, requirements and possibilities". *Energy and Buildings*, 43(10), 2549–2563.

Junior, S. A. R., Ferracane, J. L., ve Bona, Á. Della. (2008). "Flexural strength and Weibull analysis of a microhybrid and a nanofill composite evaluated by 3- and 4-point bending tests". *Dental Materials*, 24(3), 426–431.

Karche, T., ve Singh, M. R. (2019). "The application of hemp Cannabis sativa l. for a green economy: A review". *Turkish Journal of Botany*, 43(6), 710–723.

Kaya, A. İ., ve Dalgar, T. (2017). "Ses Yalıtımı Açısından Doğal Liflerin Akustik Özellikleri a Acoustic Properties of Natural Fibers for Sound Insulation". *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 37(1), 25–37.

Kaya, S., ve Oğuz, M. E. (2015). "Tesisat Yalıtımında Uygun Malzeme Seçimi". *12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 2483–2496.

Kaya, S., ve Öner, E. (2020). "Kenevir Liflerinin Eldesi, Karakteristik Özellikleri ve Tekstil

Endüstrisindeki Uygulamaları". *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(1), 108–123.

Kerni, L., Singh, S., Patnaik, A., ve Kumar, N. (2020). "A review on natural fiber reinforced composites". *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 28(xxxx), 1616–1621.

Koçlar Oral, G., ve Manioğlu, G. (2010). "Bina Cephelerinde Enerji Etkinliği ve Isı Yalıtımı". *5.Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu*, 5, 1–9.

Krzyzak, A., Kucharczyk, W., Gaska, J., ve Szczepaniak, R. (2018). "Ablative test of composites with epoxy resin and expanded perlite". *Composite Structures*, 202, 978–987.

Kumar, D., Alam, M., Zou, P. X. W., Sanjayan, J. G., ve Memon, R. A. (2020). "Comparative analysis of building insulation material properties and performance". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, 131(June), 110038.

Li, X., Tabil, L. G., ve Panigrahi, S. (2007). "Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review". *Journal of Polymers and the Environment*, 15(1), 25–33.

Manaia, J. P., Manaia, A. T., ve Rodriges, L. (2019). "Industrial Hemp Fibers: An Overview". *Fibers*, 7(12), 106.

MF, A., DRH, J., L, E., M., E., D, H., G, W., P, L., ve N, R. (2012). "Processing of Polymer Composites". *Engineering Materials 2. Pergamon. (chapter 25)*, 25, 1–10.

Mishra, S., Mohanty, A. K., Drzal, L. T., Misra, M., Parija, S., Nayak, S. K., ve Tripathy, S. S. (2003). "Studies on mechanical performance of biofibre/glass reinforced polyester hybrid composites". *Composites Science and Technology*, 63(10), 1377–1385.

Mouritz, A. P. (2012). *Metal matrix, fibre–metal and ceramic matrix composites for aerospace applications*. *Introduction to Aerospace Materials*.

Murphy, J. (1994). "The Reinforced Plastics Handbook: Reinforcements". *The Reinforced Plastics Handbook*, Elsevier, 56–94.

Naslain, R. R., ve Pomeroy, M. (2016). *Ceramic Matrix Composites: Matrices and Processing*. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier Ltd.

Ngo, T.-D. (2020). *Introduction to Composite Materials*. *Intechopen*.

Nunes, L. (2017). *Nonwood bio-based materials*. *Performance of Bio-based Building Materials*, Elsevier Ltd.

Oushabi, A., Sair, S., Oudrhiri Hassani, F., Abboud, Y., Tanane, O., ve El Bouari, A. (2017). "The effect of alkali treatment on mechanical, morphological and thermal properties of date palm fibers (DPFs): Study of the interface of DPF–Polyurethane composite". *South African Journal of Chemical Engineering*, Elsevier B.V., 23, 116–123.

Özgür, Y., Özkan, Ş., Haluk, S., Osman, Ç., İlkay, K., Şükrü, E., ve Demet, Ö. (2015). "Binalarda Isı Yalıtımı ve Isı Yalıtım Malzemeleri". *İMO Yapı Malzemeleri Komisyonu*, 487(4), 62–75.

Park, C. H., ve Lee, W. I. (2012). *Compression molding in polymer matrix composites*. *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*, Woodhead Publishing Limited.

Peças, P., Carvalho, H., Salman, H., ve Leite, M. (2018). "Natural fibre composites and their applications: A review". *Journal of Composites Science*, 2(4), 1–20.

Pedrero, A., Navacerrada, M. Á., de la Prida, D., Iglesias, L., ve Díaz-Chyla, A. (2020). "On the accuracy of the sound absorption measurement with an impedance gun". *Applied Acoustics*, Elsevier Ltd, 158, 107039.

Rahman, R., ve Putra, S. Z. F. S. (2018). *Tensile properties of natural and synthetic fiber-reinforced polymer composites*. *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Elsevier Ltd.

Rajak, D. K., Pagar, D. D., Menezes, P. L., ve Linul, E. (2019). "Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications". *Polymers*, 11(10), 1–37.

Sair, S., Oushabi, A., Kammouni, A., Tanane, O., Abboud, Y., ve El Bouari, A. (2018). "Mechanical and thermal conductivity properties of hemp fiber reinforced polyurethane composites". *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier, 8(October 2017), 203–212.

Sapuan, S. M. (2017). *Composite materials*. *Concurrent Engineering Approach.*, Elsevier Inc.

Sepe, R., Bollino, F., Boccarusso, L., ve Caputo, F. (2018). "Influence of chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites". *Composites Part B: Engineering*, Elsevier Ltd, 133, 210–217.

Shah, A. U. R., Prabhakar, M. N., ve Song, J. Il. (2017). "Current advances in the fire retardancy of natural fiber and bio-based composites – A review". *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 4(2), 247–262.

Thomsen, A. B., Rasmussen, S., Bohn, V., Nielsen, K. V., ve Thygesen, A. (2005). *Hemp raw materials : The effect of cultivar , growth conditions and pretreatment on the chemical composition of the fibres*. *Risø-R Report*.

Vidinlimen, G. T. (2010). "Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Gözenekli Malzemelerin Akustik Özellikleri ve Analizi". İstanbul Teknik Üniversitesi.

Xie, Y., Hill, C. A. S., Xiao, Z., Militz, H., ve Mai, C. (2010). "Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier Ltd, 41(7), 806–819.

EK AÇIKLAMALAR

Ek Açıklama-A: Empedans Tüpü ile Ses Yutum Katsayısı Analiz Raporları

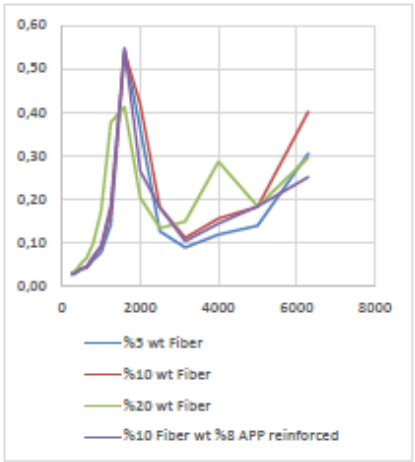
Formplast

Test Tanımı	**Empedans tüpü ses yutum kaybı deneyi**	**Tarih**	26.1.2022
İlgili Standart / Şartname	ASTM C384	**Rapor No**	FT22/063
İç / Dış Müşteri	Osmangazi Ünv.		
Tedarikçi			
Numune Adı:	KOMPOZİT		
Numune Bilgileri:	%5 wt Fiber,%10 wt Fiber,%20 wt Fiber,%10 Fiber wt %8 APP reinforced		
Testin Amacı:	Ses yutum katsayısı belirlemek		
Sıcaklığı (°C)	20		
Nem (%)	50		

Ölçüm Sonuçları

FREKANS	%5 wt Fiber	%10 wt Fiber	%20 wt Fiber	%10 Fiber wt %8 APP reinforced
250	0,03	0,03	0,03	0,02
315	0,03	0,03	0,03	0,03
400	0,03	0,03	0,04	0,03
500	0,04	0,04	0,05	0,04
630	0,04	0,04	0,06	0,04
800	0,06	0,07	0,10	0,07
1000	0,08	0,09	0,17	0,09
1250	0,14	0,17	0,38	0,18
1600	0,54	0,54	0,41	0,55
2000	0,36	0,42	0,20	0,26
2500	0,12	0,18	0,13	0,18
3150	0,09	0,11	0,15	0,10
4000	0,12	0,15	0,29	0,14
5000	0,14	0,18	0,18	0,18
6300	0,30	0,40	0,30	0,25

Ölçüm Grafiği



Hazırlayan: Hatice Kaya Uysal

Onaylayan : Selçuk BAŞAR

FR.KAL.219

Ek Açıklama-B: Devotrans Vakumlu Su Emme Cihazı ile Yüzdece Su Emme Analiz Raporları

Formplast

LABORATUVAR TEST RAPORU
LABORATORY TEST REPORT

Test Tanımı/Test Description	Vakum altında su emme testi	**Tarih/Date**	6.1.2022
İlgili Standart / Şartname/Related	ASTM D 1056	**Rapor No**	FT22-008
Test Cihazı (ekipmanı) / Test Equipment	09.001 DEVOTRANS VAKUM ALTINDA SU EMİCİLİK SERİ NO VK1201138		
İç / Dış Müşteri/Internal / External Customer	OSMANGAZİ ÜNV.		
Tedarikçi/Supplier			
Numune Adı/Sample Name	KOMPOZİT		
Numune Bilgileri/Sample Information	%5 Fiber ,%10 Fiber , %20 Fiber		
Testin Amacı/Purpose of the Test	Malzemenin vakum altında su emme yüzdesini yespit etmek.		
İrsaliye Tarihi/Waybill Date			
Parti No/Party number			

Prosedür: 17 kPa , 3 dk.
50 mm X 50 mm

Hesaplama: $W=[(A-B)/B] \times 100$

W = change in mass, %,

A = final mass of specimen,

B = initial mass of specimen,

	A (g)	B (g(	W (%)
% 5 Fiber	32,158	32,132	0,08
% 10 Fiber	28,593	28,528	0,23
% 20 Fiber	29,467	29,387	0,27

Sonuç / RESULT:

KABUL/OK [ ]

RET/NOK [ ]

Talep eden değerlendirecek/Requestor will evaluate [x]

Hazırlayan		Onay	
PREPARED	Hatice Kaya Uysal	CONFIRMATION	SELÇUK BAŞAR

FR.KAL.219

Ek Açıklama-C.1: Yanmazlık Test Analiz Raporları

Formplast

LABORATUVAR TEST RAPORU
LABORATORY TEST REPORT

Test Tanımı/Test Description	Flammability	Tarih/Date	12.8.2021
İlgili Standart / Şartname/Related	FMVSS302	Rapor No	FT21-691
Test Cihazı (ekipmanı) / Test Equipment	10.001 Yanma Test cihazı(Flammability Test Equipment)		
İç / Dış Müşteri/Internal / External Customer	OSMANGAZİ ÜNV.		
Tedarikçi/Supplier			
Numune Adı/Sample Name	KOMPOZİT - 1		
Numune Bilgileri/Sample Information			
Testin Amacı/Purpose of the Test			
İrsaliye Tarihi/Waybill Date			
Parti No/Party number			

thickness(mm)	13
length(mm)	350
width(mm)	100

Formüla — Burning Rate = $\frac{\text{Yanma mesafesi}}{\text{Yanma süresi}} \times 60$

Requested — max. 100mm/min

	Yanma mesafesi(mm)	Yanma süresi(sn)	Yanmahızı(mm/min)
1	57	130	26
2	102	220	28
3	142	264	32
Ortalama Flammability (mm/min)=			29

Sonuç

OK	NOK
X	

Hazırlayan		Onay	
PREPARED	Hatice Kaya Uysal	APPROVED	Selçuk Başar

FR.KAL.219

Ek Açıklama-C.2: Yanmazlık Test Analiz Raporu

Formplast

LABORATUVAR TEST RAPORU
LABORATORY TEST REPORT

Test Tanımı/Test Description	Flammability	Tarih/Date	12.8.2021
İlgili Standart / Şartname/Related	FMVSS302	Rapor No	FT21-692
Test Cihazı (ekipmanı) / Test Equipment	10.001 Yanma Test cihazı(Flammability Test Equipment)		
İç / Dış Müşteri/Internal / External Customer	OSMANGAZİ ÜNV.		
Tedarikçi/Supplier			
Numune Adı/Sample Name	KOMPOZİT - 1 APP ilaveli		
Numune Bilgileri/Sample Information			
Testin Amacı/Purpose of the Test			
İrsaliye Tarihi/Waybill Date			
Parti No/Party number			

thickness(mm)	13
length(mm)	350
width(mm)	100

Formüla — Burning Rate = $\frac{\text{Yanma mesafesi}}{\text{Yanma süresi}} \times 60$

Requested — max. 100mm/min

	Yanma mesafesi(mm)	Yanma süresi(sn)	Yanmahızı(mm/min)
	42	160	16

Sonuç

OK	NOK
X	

Hazırlayan PREPARED	Hatice Kaya Uysal	Onay APPROVED	Selçuk Başar

FR.KAL.219

Ek Açıklamalar-D.1: %10 Lif içerikli kompozit malzemenin eğilme dayanımı.

Load (Yük) (N)	**Yer değiştirme ΔL (mm)**	**Birim Şekil Değiştirme (ε) (mm/mm)**	**Eğilme Gerilmesi (σ) (N/mm^2)**
0,344	0,101	0,002525	0,00080625
0,046	0,102	0,00255	0,000107813
0,604	0,103	0,002575	0,001415625
0,194	0,105	0,002625	0,000454688
0,103	0,109	0,002725	0,000241406
0,522	0,111	0,002775	0,001223438
0,412	0,113	0,002825	0,000965625
0,679	0,114	0,00285	0,001591406
0,772	0,116	0,0029	0,001809375
0,021	0,12	0,003	4,92188E-05
0,021	0,122	0,00305	4,92188E-05
0,564	0,124	0,0031	0,001321875
0,468	0,146	0,00365	0,001096875
0,196	0,147	0,003675	0,000459375
0,655	0,148	0,0037	0,001535156
0,332	0,159	0,003975	0,000778125
0,729	0,165	0,004125	0,001708594
0,534	0,167	0,004175	0,001251563
0,534	0,167	0,004175	0,001251563
0,568	0,168	0,0042	0,00133125
0,079	0,17	0,00425	0,000185156
0,226	0,172	0,0043	0,000529688
0,653	0,175	0,004375	0,001530469
1,027	0,178	0,00445	0,002407031
0,848	0,18	0,0045	0,0019875
0,654	0,181	0,004525	0,001532813
1,083	0,183	0,004575	0,002538281
0,592	0,184	0,0046	0,0013875
1,335	0,185	0,004625	0,003128906
1,335	0,185	0,004625	0,003128906
0,899	0,187	0,004675	0,002107031
1,053	0,189	0,004725	0,002467969
1,019	0,19	0,00475	0,002388281
1,237	0,191	0,004775	0,002899219
1,937	0,193	0,004825	0,004539844
1,436	0,194	0,00485	0,003365625
1,238	0,196	0,0049	0,002901563
2,275	0,197	0,004925	0,005332031
1,12	0,198	0,00495	0,002625
1,712	0,2	0,005	0,0040125
2,221	0,201	0,005025	0,005205469
2,014	0,202	0,00505	0,004720313

1,349	0,203	0,005075	0,003161719
2,163	0,205	0,005125	0,005069531
2,552	0,206	0,00515	0,00598125
1,983	0,207	0,005175	0,004647656
2,349	0,209	0,005225	0,005505469
2,575	0,21	0,00525	0,006035156
2,011	0,212	0,0053	0,004713281
2,762	0,213	0,005325	0,006473438
2,722	0,215	0,005375	0,006379688
2,815	0,216	0,0054	0,006597656
2,594	0,217	0,005425	0,006079688
2,184	0,219	0,005475	0,00511875
2,808	0,22	0,0055	0,00658125
1,99	0,221	0,005525	0,004664063
3,129	0,223	0,005575	0,007333594
3,369	0,224	0,0056	0,007896094
3,588	0,226	0,00565	0,008409375
3,588	0,226	0,00565	0,008409375
2,819	0,227	0,005675	0,006607031
3,854	0,228	0,0057	0,009032813
3,036	0,23	0,00575	0,007115625
3,504	0,232	0,0058	0,0082125
3,151	0,233	0,005825	0,007385156
3,518	0,235	0,005875	0,008245313
3,171	0,236	0,0059	0,007432031
3,653	0,237	0,005925	0,008561719
4,305	0,239	0,005975	0,010089844
3,381	0,24	0,006	0,007924219
4,371	0,241	0,006025	0,010244531
3,614	0,243	0,006075	0,008470313
4,037	0,244	0,0061	0,009461719
3,197	0,245	0,006125	0,007492969
2,87	0,246	0,00615	0,006726563
4,174	0,248	0,0062	0,009782813
3,916	0,249	0,006225	0,009178125
3,996	0,25	0,00625	0,009365625
3,437	0,252	0,0063	0,008055469
3,676	0,253	0,006325	0,008615625
4,157	0,254	0,00635	0,009742969
3,343	0,256	0,0064	0,007835156
4,574	0,257	0,006425	0,010720313
4,743	0,259	0,006475	0,011116406
3,69	0,26	0,0065	0,008648438
4,663	0,261	0,006525	0,010928906
4,896	0,263	0,006575	0,011475
3,775	0,264	0,0066	0,008847656

4,381	0,266	0,00665	0,010267969
3,394	0,267	0,006675	0,007954688
4,386	0,268	0,0067	0,010279688
4,394	0,27	0,00675	0,010298438
5,256	0,271	0,006775	0,01231875
5,256	0,271	0,006775	0,01231875
4,562	0,273	0,006825	0,010692188
5,077	0,275	0,006875	0,011899219
5,077	0,275	0,006875	0,011899219
5,175	0,278	0,00695	0,012128906
4,44	0,279	0,006975	0,01040625
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
17352	4,979	0,124475	40,66875
17352	4,979	0,124475	40,66875
17357	4,981	0,124525	40,68046875
17363	4,982	0,12455	40,69453125
17368	4,984	0,1246	40,70625
17374	4,985	0,124625	40,7203125
17379	4,987	0,124675	40,73203125
17386	4,988	0,1247	40,7484375
17386	4,988	0,1247	40,7484375
17392	4,99	0,12475	40,7625
17398	4,992	0,1248	40,7765625
17403	4,993	0,124825	40,78828125
17410	4,995	0,124875	40,8046875
17416	4,996	0,1249	40,81875
17422	4,998	0,12495	40,8328125
17422	4,998	0,12495	40,8328125
17429	4,999	0,124975	40,84921875
17434	5,001	0,125025	40,8609375
17440	5,003	0,125075	40,875
17448	5,004	0,1251	40,89375
17453	5,006	0,12515	40,90546875
17453	5,006	0,12515	40,90546875
17458	5,007	0,125175	40,9171875
17465	5,009	0,125225	40,93359375
17470	5,011	0,125275	40,9453125
17476	5,012	0,1253	40,959375
17481	5,014	0,12535	40,97109375
17481	5,014	0,12535	40,97109375
17487	5,015	0,125375	40,98515625
17492	5,017	0,125425	40,996875
17496	5,019	0,125475	41,00625
17499	5,02	0,1255	41,01328125

17502	5,022	0,12555	41,0203125
17502	5,022	0,12555	41,0203125
17505	5,023	0,125575	41,02734375
17506	5,025	0,125625	41,0296875
17509	5,027	0,125675	41,03671875
17511	5,028	0,1257	41,04140625
17513	5,03	0,12575	41,04609375
17513	5,03	0,12575	41,04609375
17511	5,032	0,1258	41,04140625
17509	5,033	0,125825	41,03671875
17508	5,034	0,12585	41,034375
17507	5,036	0,1259	41,03203125
17507	5,037	0,125925	41,03203125
17508	5,038	0,12595	41,034375
17510	5,04	0,126	41,0390625
17511	5,041	0,126025	41,04140625
17512	5,043	0,126075	41,04375
17514	5,044	0,1261	41,0484375
17515	5,045	0,126125	41,05078125
17517	5,047	0,126175	41,05546875
17514	5,049	0,126225	41,0484375
17514	5,049	0,126225	41,0484375
17513	5,05	0,12625	41,04609375
17515	5,052	0,1263	41,05078125
17516	5,053	0,126325	41,053125
17518	5,054	0,12635	41,0578125
17521	5,056	0,1264	41,06484375
17521	5,057	0,126425	41,06484375
17521	5,059	0,126475	41,06484375
17521	5,061	0,126525	41,06484375
17520	5,062	0,12655	41,0625
17514	5,063	0,126575	41,0484375
17508	5,065	0,126625	41,034375
17504	5,066	0,12665	41,025
17499	5,067	0,126675	41,01328125
17495	5,069	0,126725	41,00390625
17495	5,069	0,126725	41,00390625
17491	5,07	0,12675	40,99453125
17488	5,072	0,1268	40,9875
17480	5,073	0,126825	40,96875
17472	5,074	0,12685	40,95
17465	5,076	0,1269	40,93359375
17454	5,077	0,126925	40,9078125
17428	5,079	0,126975	40,846875
17364	5,08	0,127	40,696875
7793	5,082	0,12705	18,26484375

1047,5	5,083	0,127075	2,455078125
140,74	5,084	0,1271	0,329859375
13,304	5,086	0,12715	0,03118125
0,161	5,087	0,127175	0,000377344
0,161	5,087	0,127175	0,000377344
0,519	5,089	0,127225	0,001216406
0,886	5,089	0,127225	0,002076563
0,495	5,089	0,127225	0,001160156
0,111	5,089	0,127225	0,000260156
0,099	5,089	0,127225	0,000232031
0,253	5,089	0,127225	0,000592969
0,04	5,089	0,127225	0,00009375
0,153	5,089	0,127225	0,000358594
0,496	5,089	0,127225	0,0011625
0,131	5,089	0,127225	0,000307031
0,068	5,089	0,127225	0,000159375
0,178	5,089	0,127225	0,000417188
0,391	5,089	0,127225	0,000916406
0,091	5,089	0,127225	0,000213281
0,436	5,089	0,127225	0,001021875
0,107	5,089	0,127225	0,000250781
0,677	5,089	0,127225	0,001586719

Ek Açıklamalar-D.2: %30 Lif içerikli kompozit malzemenin eğilme dayanımı

Load (Yük) (N)	**Yer değiştirme ΔL (mm)**	**Birim Şekil Değiştirme (ε) (mm/mm)**	**Eğilme Gerilmesi (σ) (N/mm^2)**
52,098	0,108	0,0027	0,135296053
56,813	0,12	0,003	0,147540686
61,107	0,133	0,003325	0,158692001
66,044	0,145	0,003625	0,171513158
73,306	0,166	0,00415	0,19037223
76,664	0,175	0,004375	0,199092798
85,085	0,195	0,004875	0,220961738
90,664	0,205	0,005125	0,235450139
97,712	0,216	0,0054	0,253753463
104,48	0,226	0,00565	0,27132964
122,14	0,249	0,006225	0,317191828
134,54	0,262	0,00655	0,349394044
153,23	0,272	0,0068	0,397931094
173,38	0,283	0,007075	0,450259695
201,63	0,295	0,007375	0,523623615
234,15	0,308	0,0077	0,608076524
265,61	0,32	0,008	0,689776662
307,27	0,334	0,00835	0,79796572
376,95	0,359	0,008975	0,978921399
408,15	0,37	0,00925	1,05994633
439,29	0,38	0,0095	1,140815443
477,02	0,393	0,009825	1,238798476
546,44	0,414	0,01035	1,419078947
586,28	0,426	0,01065	1,522541551
625,66	0,439	0,010975	1,624809557
672,83	0,453	0,011325	1,747307825
708,01	0,463	0,011575	1,838668629
750,56	0,476	0,0119	1,949168975
825,33	0,497	0,012425	2,143343144
864,58	0,508	0,0127	2,245273546
909,93	0,52	0,013	2,36304536
955,3	0,532	0,0133	2,480869114
1002,7	0,545	0,013625	2,603964681
1051,9	0,557	0,013925	2,731734765
1101,9	0,569	0,014225	2,86158241
1203,5	0,594	0,01485	3,125432825
1262,7	0,608	0,0152	3,279172438
1313,8	0,621	0,015525	3,411876731
1375,4	0,635	0,015875	3,57184903

1420,9	0,645	0,016125	3,690010388
1472,6	0,658	0,01645	3,824272853
1525,1	0,67	0,01675	3,960612881
1613,6	0,691	0,017275	4,190443213
1659,1	0,702	0,01755	4,308604571
1698,6	0,711	0,017775	4,411184211
1752,4	0,723	0,018075	4,550900277
1843,7	0,744	0,0186	4,788002078
1890,1	0,755	0,018875	4,908500693
1935	0,766	0,01915	5,025103878
2036,2	0,789	0,019725	5,287915512
2080,4	0,799	0,019975	5,402700831
2125,1	0,81	0,02025	5,518784626
2169,6	0,82	0,0205	5,63434903
2264,2	0,843	0,021075	5,880020776
2310,9	0,854	0,02135	6,001298476
2361,9	0,866	0,02165	6,133743075
2411,1	0,879	0,021975	6,261513158
2454	0,889	0,022225	6,372922438
2503,6	0,902	0,02255	6,501731302
2552,5	0,914	0,02285	6,628722299
2652,9	0,939	0,023475	6,889456371
2701,9	0,951	0,023775	7,016707064
2750,5	0,964	0,0241	7,142918975
2800,7	0,976	0,0244	7,273286011
2853,4	0,988	0,0247	7,410145429
2905,6	1,001	0,025025	7,545706371
2962,1	1,015	0,025375	7,692434211
3017,6	1,029	0,025725	7,836565097
3073,5	1,043	0,026075	7,981734765
3128,2	1,057	0,026425	8,123788089
3175,5	1,07	0,02675	8,246623961
3233,3	1,084	0,0271	8,396727839
3282,1	1,096	0,0274	8,523459141
3335,5	1,11	0,02775	8,662136427
3381,8	1,123	0,028075	8,782375346
3428,8	1,135	0,028375	8,904432133
3535,3	1,16	0,029	9,181007618
3586,2	1,172	0,0293	9,313192521
3636,8	1,185	0,029625	9,444598338
3693,5	1,199	0,029975	9,591845568
3743	1,211	0,030275	9,720394737
3793,2	1,223	0,030575	9,850761773

3842,8	1,236	0,0309	9,979570637
3890,5	1,248	0,0312	10,10344529
3936,1	1,261	0,031525	10,22186634
3981,8	1,273	0,031825	10,34054709
4028,4	1,285	0,032125	10,4615651
4126,9	1,312	0,0328	10,71736496
4172,6	1,324	0,0331	10,83604571
4216,4	1,337	0,033425	10,94979224
4259,7	1,349	0,033725	11,0622403
4302,8	1,361	0,034025	11,17416898
4341,4	1,372	0,0343	11,27441136
4386,1	1,384	0,0346	11,39049515
4465,8	1,407	0,035175	11,5974723
4502,4	1,418	0,03545	11,69252078
4542,6	1,43	0,03575	11,79691828
4577	1,441	0,036025	11,88625346
4618,7	1,453	0,036325	11,9945464
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
19842	9,404	0,2351	51,52873961
19853	9,422	0,23555	51,55730609
19863	9,438	0,23595	51,58327562
19871	9,454	0,23635	51,60405125
19883	9,47	0,23675	51,63521468
19895	9,486	0,23715	51,66637812
19895	9,486	0,23715	51,66637812
19909	9,503	0,237575	51,70273546
19920	9,519	0,237975	51,73130194
19930	9,535	0,238375	51,75727147
19939	9,551	0,238775	51,78064404
19947	9,569	0,239225	51,80141967
19947	9,569	0,239225	51,80141967
19955	9,585	0,239625	51,82219529
19962	9,601	0,240025	51,84037396
19967	9,617	0,240425	51,85335873
19970	9,633	0,240825	51,86114958
19971	9,648	0,2412	51,86374654
19978	9,664	0,2416	51,88192521
19978	9,664	0,2416	51,88192521
19985	9,68	0,242	51,90010388
19994	9,696	0,2424	51,92347645
20006	9,714	0,24285	51,95463989

20017	9,73	0,24325	51,98320637
20026	9,746	0,24365	52,00657895
20034	9,763	0,244075	52,02735457
20034	9,763	0,244075	52,02735457
20027	9,779	0,244475	52,0091759
19777	9,793	0,244825	51,35993767
19677	9,808	0,2452	51,10024238
19659	9,823	0,245575	51,05349723
19659	9,838	0,24595	51,05349723
19665	9,852	0,2463	51,06907895
19675	9,866	0,24665	51,09504848
19691	9,882	0,24705	51,13659972
19705	9,896	0,2474	51,17295706
19721	9,912	0,2478	51,21450831
19734	9,926	0,24815	51,2482687
19733	9,94	0,2485	51,24567175
19723	9,956	0,2489	51,21970222
16248	9,97	0,24925	42,19529086
16248	9,97	0,24925	42,19529086
7036,4	9,984	0,2496	18,27319945
5802,4	10	0,25	15,06855956
5711,6	10,016	0,2504	14,83275623
5736,8	10,032	0,2508	14,89819945
5766,2	10,048	0,2512	14,97454986
5790,4	10,064	0,2516	15,03739612
5803,7	10,08	0,252	15,0719356
5803,7	10,08	0,252	15,0719356
5815,6	10,094	0,25235	15,10283934
5829,9	10,112	0,2528	15,13997576
5835,6	10,128	0,2532	15,15477839
5816,9	10,143	0,253575	15,10621537
5656,7	10,159	0,253975	14,69018352
5629,3	10,173	0,254325	14,61902701
5619	10,189	0,254725	14,59227839
5619	10,189	0,254725	14,59227839
5615,1	10,205	0,255125	14,58215028
5616,6	10,219	0,255475	14,58604571
5617,5	10,235	0,255875	14,58838296
5612	10,249	0,256225	14,57409972
5607,8	10,265	0,256625	14,56319252
5603,9	10,281	0,257025	14,5530644
5600,9	10,295	0,257375	14,54527355
5599,2	10,311	0,257775	14,54085873

5596,5	10,326	0,25815	14,53384695
5598,7	10,341	0,258525	14,53956025
5598,7	10,341	0,258525	14,53956025
5599,3	10,356	0,2589	14,54111842
5577,7	10,371	0,259275	14,48502424
5560,6	10,387	0,259675	14,44061634
5551	10,403	0,260075	14,4156856
5541,2	10,417	0,260425	14,39023546
5539,7	10,433	0,260825	14,38634003
5542,9	10,449	0,261225	14,39465028
5546,1	10,463	0,261575	14,40296053
5547,6	10,479	0,261975	14,40685596
5547,6	10,479	0,261975	14,40685596
5550,2	10,495	0,262375	14,41360803
5552,2	10,509	0,262725	14,41880194
5556	10,525	0,263125	14,42867036
5556	10,541	0,263525	14,42867036
5556,1	10,555	0,263875	14,42893006
5552,1	10,571	0,264275	14,41854224
5547,1	10,587	0,264675	14,40555748
5529,6	10,601	0,265025	14,3601108
5490,9	10,617	0,265425	14,25960873
5490,9	10,617	0,265425	14,25960873
5447,7	10,633	0,265825	14,14742036
5421,3	10,649	0,266225	14,0788608
5404,7	10,665	0,266625	14,03575139
5380,4	10,681	0,267025	13,97264543
5357,8	10,697	0,267425	13,91395429
5345,8	10,711	0,267775	13,88279086
5337,8	10,727	0,268175	13,86201524
5337,8	10,727	0,268175	13,86201524
5326,7	10,743	0,268575	13,83318906
5298,4	10,759	0,268975	13,75969529
5292,9	10,774	0,26935	13,74541205