T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI TÜRDEKİ POLİMER BAĞLAYICILI VE ELYAF TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN PERFORMANSININ İNCELENMESİ

NESLİHAN GÖKÇE

DOKTORA TEZİ
DİSİPLİNLERARASI KOMPOZİT MALZEME TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
PROF. DR. SERKAN SUBAŞI

DÜZCE, 2019

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI TÜRDEKİ POLİMER BAĞLAYICILI VE LİF TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Neslihan GÖKÇE tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Disiplinler arası Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Serkan SUBAŞI
Düzce Üniversitesi _____

Prof. Dr. Osman GENÇEL
Bartın Üniversitesi _____

Doç. Dr. Arif ÖZKAN
Kocaeli Üniversitesi _____

Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU
Düzce Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi İkrime ORKAN UÇAR
Düzce Üniversitesi _____

Tez Savunma Tarihi: 11.07.2019

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

11 Temmuz 2019

(İmza)

Neslihan GÖKÇE

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı değerli hocam Prof. Dr. Serkan SUBAŞI'ya, bilimsel anlamda bilgi ve tecrübelerini aldığım Prof. Dr. Osman GENÇEL'e, Doç. Dr. Ahmet Beycioğlu ve Öğretim Görevlisi Dr. Bayram POYRAZ'a, Dr. Öğretim Üyesi İkrime Orkan UÇAR'a, Dr. Öğretim Üyesi Şevki EREN'e, deneysel çalısmalarda yardımını, zamanını benimle paylaşan çalışma arkadaşım Yusuf ÇABUKOĞLU'na en içten dileklerimle teşekkür ederim. Tüm kariyerim süresince yükselebilmem için tüm fedakarlıkları gösteren biricik annem Gülsen ERGÜN'e ve babam Ahmet ERGÜN'e, bu çalışmanın her aşamasındaki tüm katkilerından dolayı sevgili eşim EROL GÖKÇE'ye, manevi desteğim olan sevgili kızlarım Zeynep ve Ecenaz'a ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

11 Temmuz 2019 **Neslihan GÖKÇE**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ viii
ÇİZELGE LİSTESİ xi
KISALTMALAR xii
SİMGELER xiv
ÖZET xv
ABSTRACT xvi
EXTENDED ABSTRACT 17
1. GİRİŞ 20
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI 23
2.1. KOMPOZİT MALZEMELER VE HİBRİT YAPILER 23
2.2. KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİNDE KULLANILAN ELYAFLAR 28
2.2.1. Cam Elyafları 29
2.2.1.1. Cam Elyaf Kaplama Malzemeleri 32
2.2.2. Karbon Elyaflar 34
2.2.3. Aramid Elyaflar 35
2.2.4. Kevlar Elyaflar 36
2.2.5. Doğal Elyaflar 37
2.3. KOMPOZİT MALZEMELERDE MATRİSLİ YAPILER 37
2.3.1. Vinilester Reçineler 39
2.3.2. Epoksi Reçineleri 44
2.3.3. Doymamış Polyester Reçineler 46
2.3.3.1. Doymamış Polyester Reçinenin Kopolimerizasyon Monomeri 53
2.3.3.2. Doymamış Polyester Reçinelerin Kür Sistemleri 57
2.4. ELYAF TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLER 60
2.5. POLİMER MATRİSLERİN GENEL ÜRETİM YÖNTEMLERİ 61
2.5.1. El Yatırması Metodu 62
2.5.2. Püskürtme Metodu 64
2.5.3. Reçine İnfüzyonu Metodu 66
2.5.4. Reçine Transfer Kalıplama (RTM) Metodu 68
2.5.5. Sac ve Dökme Kalıplama Bileşikleri (SMC ve BMC) Metodu 69
2.5.6. Pultruzyon Metodu 72
2.5.7. Sarma ve Santrüfüj Döküm Metodu 73
2.6. POLİMER KOMPOZİTLERLE İLGİLİ LİTERATÜR TARAMASI 74
3. MATERYAL VE YÖNTEM 92
3.1. MATERYAL 92
3.1.1. Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Matris Malzemeleri 92

3.1.2. Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Takviye Malzemesi 94
3.1.3 Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Kürleştirici Kimyasallar ... 96
3.2. YÖNTEM 98
3.2.1. İki Tabakalı Reçine Plakalarının Hazırlanması 98
3.2.2. Hibrit Reçine Karışımlarının Hazırlanması 99
3.2.3. E-tipi Cam Elyaflı Hibrit Reçine Karışımlarının Hazırlanması 101
3.2.4. SEM Görüntüleri 104
3.2.5. Fiziksel Testler 106
3.2.6. Barcol Sertlik Testi 108
3.2.7. Çekme Dayanımı Testi 109
3.2.8. Eğilme Dayanımı Testi 113
3.2.9. Charpy Darbe Dayanımı Testi 115
3.2.10. Isı altında Deformasyon Sıcaklığı (HDT) Testi 118
3.2.11. FT-IR (Fouirer Transform Infrared Spektrofotometre) 118
3.2.12. TGA (Termo Gravimetrik Analiz) 119
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 120
4.1. SEM GÖRÜNTÜLERİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ 120
4.2. FİZİKSEL TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME 122
4.3. BARCOL SERTLİK TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME 124
4.4. ÇEKME DAYANIMI TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME 124
4.4.1. Reçine Karışımlarının Çekme Test Sonuçları ve Değerlendirme 124
4.4.2. Cam Elyaflı Kompozitlerin Çekme Test Sonuçları ve Değerlendirme. 131
4.5. EĞİLME DAYANIMI TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME 143
4.5.1. Reçine Karışımlarının Eğilme Test Sonuçları ve Değerlendirme 143
4.5.2. Cam Elyaflı Kompozitlerin Eğilme Test Sonuçları ve Değerlendirme 147
4.6. CHARPY DARBE TESTİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME 157
4.7. HDT TESTİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME 159
4.8. FT-IR SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME 161
4.9. TGA TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME 164
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 169
6. KAYNAKLAR 177
ÖZGEÇMİŞ 186

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Takviye çeşitleri (a) Parçacık, (b) Pul, (c) Uzun elyaf şeklinde. 24
Şekil 2.2. Elyaf dokuma çeşitleri. 24
Şekil 2.3. Cam elyafı üretimi sırasında kaplama uygulama diyagramı. 32
Şekil 2.4. Cam elyafı kaplama maddesiyle işlemden geçirme. 34
Şekil 2.5. Elyaf görselleri (a) Cam elyafı, (b) Kevlar elyafı ve (c) Karbon elyafı.....36
Şekil 2.6. Epoksi reçine ve akrilik asitten elde edilen vinilesterin genel yapısı. 39
Şekil 2.7. Bisfenol A ve akrilik asidin diglisidil eterine dayanan vinilester reçinesi. ... 41
Şekil 2.8. Epoksi yapısı (a) Epoksi oksiran halka (b) Sertleşmiş epoksi.. 45
Şekil 2.9. Tipik epoksi monomerleri. 45
Şekil 2.10. UPR omurgasının sentezi ve stiren ile çapraz bağlanması. 47
Şekil 2.11. Cis-maleat'in transfumarata izomerizasyonu. 49
Şekil 2.12. Ftalik asit, izoftalik asit ve tereftalik asit yapileri. 51
Şekil 2.13. Dipropilen glikol, dietilen glikol ve adipik asit yapileri. 51
Şekil 2.14. Laboratuvar ölçeğinde doymamış polyester reçine hazırlanması. 53
Şekil 2.15. Stiren çapraz bağlı UP reçine zincirlerinin kimyasal yapısı. 54
Şekil 2.16. Orto ve izo polyesterler için viskozite-stiren içeriği. 57
Şekil 2.17. UPR ve VER üretim teknolojilerine genel bakış. 62
Şekil 2.18. El yatırması işleminin şematik gösterimi. 63
Şekil 2.19. Püskürtme işleminin şematik gösterimi. 65
Şekil 2.20. Otomatik püskürtme yerleştirme işlemi. 65
Şekil 2.21. Reçine infüzyon işleminin şematik gösterimi. 67
Şekil 2.22. Reçine Transfer Kalıplama (RTM) işleminin şematik gösterimi. 68
Şekil 2.23. RTM ile üretilen tipik bir kompozit otobüs paneli. 69
Şekil 2.24. SMC işleminin şematik gösterimi. 71
Şekil 2.25. BMC işleminin şematik gösterimi. 71
Şekil 2.26. Pultruzyon sürecinin şematik gösterimi. 72
Şekil 2.27. Sarma prosesi. 73
Şekil 2.28. Santrifüj savurma prosesi. 73
Şekil 3.1. Kullanılan reçineler a) Ortoftalik b) İzoftalik c) Tereftalik d) Vinilester.....92
Şekil 3.2. Kompozit üretiminde kullanılan kimyasalların genel yapıları. 94
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan E tipi cam elyafı. 95
Şekil 3.4. Cam elyaflarının kimyasal bileşenlerinin analizi. 96
Şekil 3.5. Reçine karışımlarının cam kalıplarda dökülme ve sertleştirme işlemi. 100
Şekil 3.6. Kalıpların ıslatılması ve takviyesinin kalıplara yerleştirilmesi. 103
Şekil 3.7. Elyaf takviyeli hibrit reçine karışımlarına ait plakaların görseli. 104
Şekil 3.8. İki tabakalı olarak üretilen reçine plakalarının kalıplama işlemi. 105
Şekil 3.9. İki tabakalı olarak üretilen reçine plakalarına ait görsel. 105
Şekil 3.10. SEM analiz cihazı. 106
Şekil 3.11. Reçine karışımlarının jelleşme süresi ve pik ekzoterm sıcaklığının tespiti.107

Şekil 3.12. DVE tipi Brookfield viskozimetre cihazı. 108
Şekil 3.14. Çekme dayanımı testine tabi tutulan numune boyutları. 110
Şekil 3.15. Reçine plakalarından mekanik test numunelerinin kesim işlemi. 110
Şekil 3.16. Reçine eğilme ve çekme dayanımı test numuneleri. 111
Şekil 3.17. Reçine eğilme ve çekme dayanımı test numunelerinin boyutsal ölçümü... 111
Şekil 3.18. Reçine karışımlarının çekme dayanımı testi..... 112
Şekil 3.19. Elyaf takviyeli reçine karışımlarının çekme dayanımı testi. 112
Şekil 3.20 Reçine karışımlarının eğilme dayanımı testi. 114
Şekil 3.21. Elyaf takviyeli reçine karışımlarının eğilme dayanımı testi. 114
Şekil 3.22. Sulu kesim cihazında charpy test numuneleri kesim işlemi. 116
Şekil 3.23. Charpy test cihazı. 116
Şekil 3.24. Charpy test numuneleri. 117
Şekil 3.25. Charpy testleri sonucu kırılen numuneler. 117
Şekil 3.26. HDT Test Cihazı. 118
Şekil 3.27. FT-IR cihazı. 119
Şekil 3.28. TGA cihazı. 119
Şekil 4.1. Ortoftalik-vinylester SEM görüntüsü a) 200 µm b) 100 µm c) 50 µm. 120
Şekil 4.2. İzoftalik-vinylester SEM görüntüsü a) 200 µm b) 100 µm c) 50 µm..... 121
Şekil 4.3. Tereftalik-vinylester SEM görüntüsü a) 200 µm b) 100 µm c) 50 µm..... 121
Şekil 4.4. Ham reçinelere ait jelleşme ve pikekzoterm sıcaklığı eğrileri. 123
Şekil 4.5. Farklı reçine ve hibrit karışımlarına ait ortalama çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması. 126
Şekil 4.6. OTV reçine karışımına ait çekme dayanımı-birim deformasyon eğrisi. 128
Şekil 4.7. Farklı reçine ve hibrit karışımlarına ait ortalama çekme elastikiyet modülü değerlerinin karşılaştırılması. 129
Şekil 4.8. Farklı reçine ve hibrit karışımlarına ait ortalama çekme uzama değerlerinin karşılaştırılması. 130
Şekil 4.9 Ağırlıkça %5 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması. 132
Şekil 4.10. Ağırlıkça %5 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme elastikiyet modülü değerlerinin karşılaştırılması. 133
Şekil 4.11. Ağırlıkça %5 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme uzama değerlerinin karşılaştırılması. 134
Şekil 4.12. Ağırlıkça %10 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması. 136
Şekil 4.13. OV+%10 hibrit kompozitinin çekme dayanımı-birim deformasyon eğrisi. 136
Şekil 4.14. Ağırlıkça %10 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme elastikiyet modülü değerlerinin karşılaştırılması. 137
Şekil 4.15. Ağırlıkça %10 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme uzama değerlerinin karşılaştırılması. 138
Şekil 4.16. Ağırlıkça %20 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması. 140
Şekil 4.17. Ağırlıkça %20 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme elastikiyet modülü değerlerinin karşılaştırılması. 141
Şekil 4.18. Ağırlıkça %20 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme uzama değerlerinin karşılaştırılması. 142

Şekil 4.19. Farklı reçine ve hibrit karışımlara ait ortalama eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması. 144
Şekil 4.20. OTV reçine karışımına ait eğilme dayanımı-birim deformasyon eğrisi. 146
Şekil 4.21. Farklı reçine ve hibrit karışımlara ait ortalama eğilme E modülü değerlerinin karşılaştırılması. 146
Şekil 4.22. Ağırlıkça %5 oranında cam elyaf takviyesi Yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması. 149
Şekil 4.23. Ağırlıkça %5 oranında cam elyaf takviyesi Yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama eğilme elastikiyet modülü değerlerinin karşılaştırılması. 150
Şekil 4.24. Ağırlıkça %10 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması. 152
Şekil 4.25. Ağırlıkça %10 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama eğilme elastikiyet modülü değerlerinin karşılaştırılması. 153
Şekil 4.26. Ağırlıkça %20 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması. 154
Şekil 4.27. TIV+%20 hibrit kompoziti eğilme dayanımı-birim deformasyon eğrisi.... 155
Şekil 4.28. Ağırlıkça %20 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama eğilme elastikiyet modülü değerlerinin karşılaştırılması. 156
Şekil 4.29. Farklı reçine ve hibrit karışımlarına ait ortalama charpy darbe enerjisi değerlerinin karşılaştırılması. 157
Şekil 4.30. Reçine ve hibrit karışımlarına ait ortalama ısıl bozunma sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması. 160
Şekil 4.31. Reçinelerin FT-IR sonuçları. 161
Şekil 4.32. İkili reçine karışımlarından üretilen hibrit reçinelerin FT-IR sonuçları. 162
Şekil 4.33. Üçlü reçine karışımlarından üretilen hibrit reçinelerin FT-IR sonuçları. ... 163
Şekil 4.34. Reçinelerin TGA sonuçları. 165
Şekil 4.35. İkili reçine karışımlarından üretilen hibrit reçinelerin TGA sonuçları. 166
Şekil 4.36. Üçlü reçine karışımlarından üretilen hibrit reçinelerin TGA sonuçları. 167

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. Kompozit Malzeme teknolojilerinin karşılaştırılması. 26
Çizelge 2.2. Kompozitlerde matris ve takviye rolleri. 27
Çizelge 2.3. E ve ECR cam elyafının kimyasal bileşimi. 30
Çizelge 2.4. Farklı cam elyaf tiplerinin kimyasal bileşimi. 30
Çizelge 2.5. Cam ve karbon elyafı arasındaki farklar. 32
Çizelge 2.6. Stirenli sıvı vinilester reçinenin özellikleri. 43
Çizelge 2.7. Kürlenmiş dökme vinilester reçinesinin fiziksel özellikleri. 43
Çizelge 2.8. UPR ve VER formülasyonundaki bileşik katkı maddelerinin işlevleri. 44
Çizelge 2.9. Doymamış polyester üretiminde sık olarak kullanılan hammaddeler. 48
Çizelge 2.10. Tipik bir polyester reçinesi üretimi için reaktördeki miktarlar. 50
Çizelge 2.11. Stirenli sıvı UPR reçinenin özellikleri. 56
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan reçine türlerinin fiziksel ve mekanik özellikleri. 93
Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan kırpılmış elyaf takviyesinin fiziksel özellikleri. 95
Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan kobalt katalizörün özellikleri. 97
Çizelge 3.4. Çalışmada kullanılan metil etil keton peroksit başlatıcının özellikleri. 97
Çizelge 3.5. Fiziksel özellik testleri yapilen reçine karışımları. 101
Çizelge 3.6. Elyaf takviyeli reçine karışımları için yapilen deneysel çalışma planı. 102
Çizelge 3.7. Reçine karışımlarına ait fiziksel özellik testleri ve standartları. 106
Çizelge 3.8. Hazırlanan reçine karışımları ve deneysel çalışma planı. 109
Çizelge 4.1. Hibrit reçine karışımlarına ait fiziksel test sonuçları. 122
Çizelge 4.2. Hibrit reçine karışımlarına ait barcol sertlik testi sonuçları. 124
Çizelge 4.3. Farklı reçine türleri ve karışımlarının çekme testi sonuçları. 125
Çizelge 4.4. %5 cam elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin çekme testi sonuçları. 131
Çizelge 4.5. %10 cam elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin çekme testi sonuçları. 135
Çizelge 4.6. %20 cam elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin çekme testi sonuçları. 139
Çizelge 4.7. Farklı reçine türleri ve karışımlarının eğilme testi sonuçları. 144
Çizelge 4.8. %5 cam elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin eğilme testi sonuçları. 148
Çizelge 4.9. %10 cam elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin eğilme testi sonuçları. 151
Çizelge 4.10. %20 cam elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin eğilme testi sonuçları. 154
Çizelge 4.11. Farklı reçine türleri ve karışımlarının charpy darbe enerjisi değerleri. 157
Çizelge 4.12. Farklı reçine türleri ve karışımlarının HDT değerleri. 159
Çizelge 4.13. Hibrit reçinelerin sıcaklığa bağlı kütle kaybı miktarları. 166

KISALTMALAR

A	Yüksek alkali
AA	Adipik asit
AF	Aramid elyaf
BMC	Dökme kalıplama (Bulk molding compounds)
BMI	Bismaleimide
C	Kimyasal (Chemical)
C-E	Karbon/Epoksi
CF	Karbon elyaf
CHDM	Sikloheksan dimetanol
CMC	Seramik matrisli kompozitler (Ceramic martis composites)
DAP	Dialilftalat
DBNPG	Dibromoneopentil glikol
DEG	Dietilen glikol
DGEBA	Doymamış balzamik asitler ile bisfenol-a
DMF	Dimetilformamid
DMP	Dimetil ftalat
DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetre (Differential scanning calorimetry)
E	Elektriksel
E-Cam Elyafı	Elektriksel dirençli cam elyafı
ECR	Elektriksel, kimyasal
EDX	Enerji yayılımlı x-ışını analizi
EG	Etilen glikol
EPN	Felolik novalak epoksi reçine
ETBN	Epoksi uçlu nitril kauçuk
FA	Fumarik asit
FR	Alev geciktirici (Fire resistance)
FRP	Elyaf takviyeli plastikler (Fiber reinforced plastics)
FT-IR	Fourier dönüşümlü ınfrared spektrofotometre
G-E	Cam/epoksi
GF	Cam elyaf (Glass fiber)
GFRP	Cam elyaf takviyeli plastikler (Glass fiber reinforced plastics)
GRP	Cam takviyeli plastikler (Glass reinforced plastics)
HBPA	Hidrojenlenmiş bisfenol-A
HDT	Isıl bozunma sıcaklığı
IPA	İzoftalik asit
MA	Maleik asit
MA	Maleik anhidrit
MEKP	Metil etil keton peroksit
MMA	Metakrilet
MMC	Metal matrisli kompozitler
NF	Doğal elyaf (Natural fiber)
NFC	Doğal elyaf kompozitler (Natural fiber composites)
NPG	Neopentil glikol

PA	Ftalik anhidrit
PBPA	Propoksiletlı bisphenol a
PET	Polietilen tereftalat
PG	Propilen glikol
pH	Potansiyel hidrojen
PMC	Plastik matrisli kompozitler
PMS	Para-metil stiren
PTFE	Polytetrafloretilen
PVA	Polivinil alkol
REACH	Kimyasalların tescili, değerlendirilmesi, yetkilendirilmesi, kısıtlanması
RIM	Reaksiyon enjeksiyonlu kalıplama (Reaction ınjection molding)
RT	Oda sıcaklığı
RTM	Reçine transfer kalıplama (Resin transfer molding)
S Cam Elyafı	Yüksek mukavemetli cam elyafı
SADT	Kendiliğinden hızlandırılmış bozunma sıcaklığı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu (Scanning electron microscopy)
SMC	Levha kalıplama bileşiği (Sheet molding compounds)
SPI	Plastik endüstrisi birliği
Tg	Camsı geçiş sıcaklığı
TGA	Termo gravimetrik analiz
TGMDA	Tetraglisilmetilendilinilin
THF	Tetrahydrofuran
TMPD	Trimetilpentanediol
TPA	Tereftalik asit
UP	Doymamış polyester
UPEAs	Doymamış poli (ester-amit) reçinesi
UPR	Doymamış polyester reçineler
UPRG	Dipropilen glikol
UV	Ultraviyole
VE	Vinilester
VER	Vinilester reçine
VT	Vinil toluen
WPC	Ahşap plastik kompozitler (Wood pastic composites)

SİMGELER

A	Alan
Co	Kobalt oktoat
$E_{ç}$	Çekme E modülü
F	Yük
$\sigma_{ç}$	Çekme dayanımı
σ	Eğilme dayanımı
ε	Birim deformasyon

ÖZET

FARKLI TÜRDEKİ POLİMER BAĞLAYICILI VE LİF TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Neslihan GÖKÇE
Düzce Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü, Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı
Doktora Tezi
Danışman: Prof. Dr. Serkan SUBAŞI
Temmuz 2019, 185 sayfa

Bu çalışmada, yüksek mekanik özelliklere sahip farklı türdeki polimer bağlayıcılı ve elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin üretimi gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Üretilen hibrit kompozitlerde, matris olarak ortoftalik, izoftalik, tereftalik doymamış polyester reçineleri ve bisfenol-A bazlı vinilester reçine kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak kırpılmış E-tipi cam elyaflı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar 3 aşamadan oluşmuştur. İlk aşamada, ortoftalik, izoftalik ve tereftalik polyester reçinelerin epoksi bazlı vinilester reçine ile iki tabakalı plakaları üretilerek ara yüzey uyumu SEM görüntüleri incelenmiştir. İkinci aşamada, farklı tipteki reçinenin ikili ve üçlü hibrit karışımlarının 10 farklı kombinasyonu hazırlanarak bireysel özellikleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu aşamada öncelikle hibrit karışımlarının fiziksel ve mekanik testleri ile termal analizleri yapılmıştır. Sertleşen plakalar 50 ºC, 80 ºC ve 110 ºC de 1'er saat olmak üzere toplamda 3 saat kürleştirilmiştir. Son aşamada ise; hazırlanan reçine karışımlarına ağırlıkça %5, %10 ve %20 oranlarında kırpılmış E tipi cam elyafı takviye edilerek hibrit kompozitler üretilmiş ve mekanik testleri gerçekleştirilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde, numune plaka ara yüzeylerinde yeterince homojen yapışma sağlandığı görülmüştür. Hibrit karışımlarda elde edilen pik ekzoterm sıcaklığının 180 °C ile 190 °C arasında elde edildiği ve Barcol sertlik değerleri ile birlikte değerlendirildiğinde tüm karışımların yeterli kürleşmeyi sağlandığı sonucuna varılmıştır. Yapilen analizler neticesinde, hazırlanan tüm hibrit reçine karışımları arasında en yüksek çekme dayanımı ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV) karışımı için; vinilester ham reçine ile kıyaslandığında %11,1 daha yüksek bulunmuştur. En yüksek eğilme ve charpy darbe dayananımı ise ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV) reçine için; vinilester ham reçine ile kıyaslandığında %4,3, ortoftalik ham reçine ile kıyaslandığında %23,9 daha yüksek olarak bulunmuştur. Matris reçine hibridizasyonu elyaf takviyesi ile güçlendirildiğinde, elyaf oranı arttıkça, mekanik özelliklerin arttığı ve en yüksek mekanik özelliklerin %20 elyaf oranında elde edildiği ve elyaf oranı arttıkça hibrit reçine karışımlarının mekanik özelliklerinin yükseldiği görülmüştür. Karışımların HDT ve FT-IR analizleri incelendiğinde reçine ve hibrit karışımlarında istenen moleküler aderansların ve çapraz ağ yapısının yeterli polimerleşmenin gerçekleştirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar sözcükler: Camelyaf, Polimer kompozit, Polyester, Hibrit polimer.

ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF DIFFERENT TYPE OF POLYMER MATRIX AND FIBER REINFORCED HYBRID COMPOSITES

Neslihan GÖKÇE
Düzce University
Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Composite Material Technologies
Doctoral Thesis
Supervisor: Prof. Dr. Serkan SUBAŞI
July 2019, 185 pages

In this study, different types of polymer matrix and fiber reinforced hybrid composites with high mechanical properties were aimed to be produced. In hybrid composites, orthophthalic, isophthalic, terephthalic unsaturated polyester resin and bisphenol-A based vinylester resin were used as matrix. Chopped E glass fiber was used as reinforcement. Experimental studies consisted of 3 stages. In the first step, two layers of orthophthalic, isophthalic and terephthalic polyester resin with epoxy based vinylester resin were produced and their interface compatibility were examined by SEM images. In the second stage, hybrid mixtures of different resins were prepared in 10 different combinations to improve their individual properties. Physical and mechanical tests and thermal analyzes of the samples were performed. The plates were cured for 1 hour at 50 ºC, 80 ºC and 110 ºC for a total of 3 hours. In the last stage; 5%, 10% and 20% by weight of E glass fiber reinforced hybrid composites were produced for the same resin mixtures. Mechanical tests were carried out on the samples. When SEM images were examined, it was observed that sufficient homogeneous adhesion was achieved at the interfaces. It was concluded that the peak exotherm temperatures obtained in hybrid mixtures were between 180 °C to 190 °C and all the mixtures were cured adequately when evaluated together with Barcol hardness values. As a result of the analysis, the highest tensile strength of all hybrid resin mixtures prepared for the orthophthalic-terephthalic-vinylester (OTV) mixture; which was found to be 11,1% higher than vinylester raw resin. The highest bending and charpy impact strength for orthophthalic-isophthalic-vinylester (OIV) resin; which was found to be 4,3% higher than vinylester and 23,9% higher than the orthophthalic raw resin. When the matrix resin hybridization was strengthened with fiber reinforcement, it has been determined that as the fiber ratio is increased, the mechanical properties are increased and the highest mechanical properties are obtained at 20% fiber ratio. When the HDT and FT-IR analyzes of the mixtures were examined, it was concluded that the required molecular adherences and cross-network structure were obtained in the mixtures and polymerization was achieved.

Keywords: Fiberglass, Polymer composite, Polyester, Hybrid polymer.

EXTENDED ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF DIFFERENT TYPE OF POLYMER MATRIX AND FIBER REINFORCED HYBRID COMPOSITES

Neslihan GÖKÇE
Düzce University
Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Composite Material Technologies
Doctoral Thesis
Supervisor: Prof. Dr. Serkan SUBAŞI
July 2019, 185 pages

1. INTRODUCTION

The overall performance of composite materials are evaluated better by understanding the role of matrix materials separately. The main purpose of this research is to investigate the modifying effect of unsaturated polyester and epoxy based vinyl ester resin matrix and glass fiber reinforcement on hybrid mixtures. With this study, it is predicted that the physical properties of different types of polymer matrix mixtures as well as the mechanical performances of the glass fiber reinforced hybrid composites will be useful for the literature on this subject. In this study, unlike the existing literature; the physical and thermal analysis of different types of hybrid polymer matrix mixtures as well as the effect of fiber reinforcement on their mechanical performance were investigated. In addition, glass fiber reinforcements in different ratios were prepared and tested to investigate the fiber reinforcement ratio which would provide the highest and optimum mechanical properties.

2. MATERIAL AND METHODS

Experimental studies in the production of hybrid composite materials have been made in three stages. In the first step, the interfacial compatibility of two-layer plates with epoxy based vinylester resin of each orthophthalic, isophthalic and terephthalic polyester resin matrix was investigated. For this purpose, two-layers of sample plates consisting of epoxy-based vinyl ester resin were produced with each of the resin type. SEM images of the interface of these samples were examined.

In the second stage, hybrid mixtures of these four different types of resins were prepared in 10 different combinations and individual properties were developed. At this stage, firstly, physical tests of hybrid mixtures were performed. Afterwards, mechanical tests of all hybrid mixtures were carried out and HDT were determined, FT-IR spectrums and TGA analyzes of these samples were studied.

In the last stage, hybrid composites reinforced with chopped E type glass fiber in 5% , 10% and 20% by weight were produced for each of hybrid resin mixtures prepared for the same purpose. Tensile and flexural strength tests were carried out on these hybrid glass fiber reinforced composite materials.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

When the SEM images taken perpendicular to middle of the interfaces of all two-layer resin plates were examined, it was seen that the matrix structure was homogeneous and there was no hollow structure formation such as impurity and air bubbles. It was observed that a particularly homogeneous and uniformly adherent bonding was provided at the interfaces.

As a result of the study, mechanical test results of hybrid resin mixtures and raw resin components were obtained differently from each other. Among all hybrid resin mixtures and raw resin samples prepared, the highest tensile strength test result was found in orthophthalic-terephthalic-vinyl ester (OTV) resin and highest flexural strength was found in orthophthalic-isophthalic-vinyl ester (OIV) resin mixture. The lowest tensile strength test result was obtained for orthophthalic-isophthalic-terephthalic (OIT) resin mixture and the lowest flexural strength was found in TV resin mixture. When charpy impact test results were investigated; the highest test result was found for OIV hybrid resin mixture. IV hybrid resin sample showed the highest HDT value which was higher than its raw resin components. In addition, when all exotherm temperature and Barcol Hardness values of all resins and their hybrid mixtures were evaluated together, it was concluded that all mixtures had sufficient curing. These results also confirm high HDT results for hybrid resin mixtures, indicating that the desired level of intermolecular adherence and crosslinking was achieved. In the spectra of all mixtures, C=O interactions and C-O tensile vibrations of carbonyl groups, C-H asymmetric and tensile vibrations, bending vibrations of CH_2 groups and C-C interactions originating from aromatic ring were observed. When TGA results were evaluated; the decomposition

curves of isophthalic, terephthalic and vinyl ester resins have similer properties. When temperature-dependent mass losses of hybrid resins prepared from resin mixtures were examined; it was seen that the mass loss caused by the removal of water and low molecular weight groups in the polymers from the structure and the mass loss caused by the degradation of the main structure occur in two stages. Furthermore, it has been found that the resins obtained from phthalic acid based resins generally have higher thermal stability than vinyl ester resin.

When the mechanical tests were performed by using chopped E glass fiber reinforcement by weight of 5% , 10% and 20% in hybrid resin mixtures, it was determined that both tensile strength and tensile modulus and flexural strength and flexural modulus values increased when compared to hybrid resin mixtures without fiber reinforcement. As a result, when the matrix resin hybridization was strengthened with fiber reinforcement, in all fiber composites, it has been determined that as the fiber ratio is increased, the mechanical properties are increased and the highest mechanical properties are obtained at 20% fiber ratio.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

In this study, the mechanical strength of hybrid resin mixtures exhibited a different performance than the raw resins', it has been concluded that hybridization of resins is effective on mechanical properties. Furthermore, when the reinforcement of E glass fiber was applied to these samples and as fiber content increased, the mechanical properties of hybrid resin mixtures generally increased. These results are due to the positive effect of matrix load transfer by fiber reinforcement.

When the HDT values of the mixtures are examined, it can be concluded that the desired molecular adherances and cross-network structure are provided at sufficient levels in resin and hybrid mixtures. The physical test results of the hybrid resin mixtures also confirm high HDT results for hybrid resin mixtures, indicating that intermolecular adherence and cross-linking are achieved at the desired level. In all FT-IR spectra of samples, the characteristic C = C vibration of styrene, which is an important peak in the polymerization reaction and determines the polymerization character, should be observed at 914 cm^{-1} and 912 cm^{-1}, respectively; this means that the polymerization reaction takes place in all mixtures.

1. GİRİŞ

Yapısal bir kompozit, mekanik performansı ve özellikleri bağımsız hareket eden kurucu malzemelerin özelliklerinden üstün olacak şekilde tasarlanan, mikroskobik ölçekte iki veya daha fazla fazdan oluşan bir malzeme sistemidir. Fazlardan biri genellikle süreksiz, daha sert ve daha güçlüdür ve takviye olarak adlandırılır, daha az sert ve zayıf faz ise süreklidir ve matris olarak bilinir [1]. Bir kompozitin özellikleri, bileşenlerin özelliklerine, fazların geometrisi ve dağılımına bağlıdır [2]. Kompozitin fazları kompozit malzemenin türüne ve uygulamasına bağlı olarak farklı rollere sahiptir. Düşük ile orta performans kompozitleri durumunda, takviye, genellikle kısa elyaflar veya parçacıklar biçiminde, bazı sertleştirmeler sağlar, fakat malzemenin sadece lokal olarak güçlendirilmesini sağlar. Öte yandan matris, malzemenin mekanik özelliklerini düzenleyen ana yük taşıyıcı yapı elemanıdır. Yüksek performanslı yapısal kompozitler durumunda, sürekli elyaf takviyesi, elyaf yönündeki sertliğini ve kuvvetini belirleyen malzemenin omurgasıdır. Matris fazı bir elyaftan diğerine koruma ve lokal stres aktarımı sağlar [3].

Tarihsel olarak, elyaf takviyeli kavramı çok eskidir. Eski Mısır'da saman takviyeli kil tuğlaya yazılmış yazılar bulunmuştur, ancak 1970'lerin sonlarında kompozit uygulamalarının uçak, otomotiv ve spor ürünlerine yaygın bir şekilde kullanıldığı görülmüştür. Geçtiğimiz yıllar boyunca, kompozit endüstrisi sürekli bir büyüme kaydederek ve küresel bazda, kompozit pazarın tahmin edenlerden daha fazla büyüdüğü tespit edilmiştir [4]. Bu büyüme, kompozit malzemelerin, yüksek mukavemet, yüksek sertlik, uzun yorulma ömrü, düşük yoğunluk ve yapının amaçlanan fonksiyonuna uyarlanabilirliği gibi monolitik malzemelere göre benzersiz avantajlara sahip olduğu gerçeğine bağlanabilir. Korozyon direnci, ısıl yalıtım, ısıl iletkenlik ve ses yalıtımında ileve iyileştirmeler yapılabilir. Kompozit malzemelerin üstün yapısal performansının temeli, yüksek spesifik mukavemet ve yüksek spesifik modülde ve malzemenin anizotropik ve heterojen karakterinde yatmaktadır. İkincisi, kompozit sisteme malzemenin optimum konfigürasyonu için birçok serbestlik derecesi sağlar [5].

Son yıllarda, güçlendirilmiş polimer kompozitleri, mevcut yapıların rehabilitasyonu ve güçlendirilmesi için uygulanabilir ve rekabetçi bir alternatif olarak yapısal taşıyıcı uygulamalar için inşaat endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır. İnşaat mühendisliği uygulamalarında elyaf takviyeli plastik (FRP) kompozitleri dikkate almak için birçok

neden vardır. Elyaf takviyeli kompozitlerin sağladığı faydalar reçine, elyaf seçimi ve üretim işlemine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, kompozitin tasarımını optimize edilmesine ihtiyaç vardır, çünkü en iyi özelliklerin tümüne aynı anda ulaşilemamaktadır. Özetle, elyaf takviyeli polimer kompozitlerin ana avantajları genellikle yüksek dayanım ve sertlik, iyi yorulma performansı, sert veya korozif ortamlara dayanıklılık, düşük bakım gereksinimleri, hafiflik gibi özelliklerden biri veya daha fazlasıdır [6].

Doymamış polyester reçineler (UPR), cam elyaf takviyeli polimerlerin ve polimerik kompozitlerin üretiminde kullanılan önemli termoset malzemelerden biridir. Bu reçinelerin yaygın kullanımı, nispeten düşük maliyetli olmalarından, işlenme kolaylığından, takviye malzemesini mükemmel ıslatma özelliklerinden, iyi ve dengeli özelliklerinden kaynaklanmaktadır. UPR, doymamış polyesterin, aynı zamanda tepkimeye giren stiren benzeri doymamış bir seyrelticiye sahip çözeltileridir [7].

Genel amaçlı UPR, stiren ve 1,2 propilen glikolün kondenser ürünü ile maleik asit (MA) ve ftalik asit karışımı ile anhidrit şeklinde bir karışımıdır. Bir katalizör ve bir hızlandırıcı yardımıyla çapraz bağlama başlatıldığında; stiren, doymamışlık bölgelerinde polyester zincirlerini çapraz bağlayan polistiren zincirleri oluşturur. Sertleşmiş reçinenin yüksek çapraz bağlı üç boyutlu moleküler yapısı, yüksek sertlik, mukavemet, arttırılmış camsı geçiş sıcaklığı ve iyi ısı ve çözücü direnci sağlar. Bununla birlikte, kırılganlık ve çatlak ilerlemesine karşı zayıf direnç gibi bazı dezavantajları da vardır [8].

Her ne kadar elyaf ile güçlendirilmiş plastikteki (FRP) kusurlar çoğu zaman reçine ile takviye ara yüzü arasında sınırlandırılsa da, nispeten düşük miktarda elyaf içeren alanlar, ürün kullanımdayken veya kalıp sökme sırasında zarar görebilmektedir [9].

Sertleşme derecesi, faz ayrımlı morfolojiye büyük ölçüde bağlıdır [10]. Ayrıca, iki bileşenin türüne ve oranına, etki alanlarının şekli, bağlantısı ve boyutuna bağlıdır [11]. UPR matrisinde bir elastomerin dispersiyonu ve matris ile arasında kuvvetli yapışma arzu edilir. Katkı maddesi/reçine karışımlarının karışabilirliği ve ara yüz özellikleri, sertleştirme işleminde önemli rol oynar [10].

Son yıllarda, UPR ve diğer termosetlerin yarı iç içe geçen polimer ağlar ve hibrit polimer ağlar vasıtasıyla reaktif olarak harmanlanması yoluyla kimyasal modifikasyonlar yapılmaktadır. Çapraz bağlı bir doymamış polyester-bismaleimid

modifiye epoksi matris sistemleri ağı geliştirilmiştir [12]. Vinilester oligomer kalıplı doymamış polyester matrislerde değişen yüzdelerde bismaleimid ile iç içe geçmiş ağlar geliştirilmiştir [13]. Poliüretan prepolimerlerin ve doymamış polyesterin hibrit polimer ağları da incelenmiştir [14]. Benzer şekilde, metakriletlı nitril kauçuk veya epoksi uçlu nitril kauçuk (ETBN) veya izosiyanatlı polibütadien kullanilerak elastomer ve UPR arasında kimyasal bağ da ilgi çekici bir araştırma olmuştur [15]. Reçine ve laminatların mekanik özellikleri bu tekniklerle geliştirilmiştir.

Kompozit malzemelerin genel performansını değerlendirmek için, matris malzemelerinin rolünü ayrı ayrı anlamak önemlidir. Bu araştırmanın asıl amacı da, epoksi bazlı vinilester reçinelerin ve cam elyafı takviyesinin UPR çeşitleri ile hibrit karışımlarının üzerindeki değiştirici etkisini araştırmaktır. Üretilen farklı türdeki polimer bağlayıcılı ve elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin, mekanik özellikleri bakımından bazı avantajlar sağlamak suretiyle son ürünün imalatı ve proses edilebilirliği sırasında maliyet açısından da kazanım sağlaması mümkündür. Mekanik özellikleri daha üstün olarak sonuç veren farklı türdeki hibrit polimer bağayıcılı karışım ve elyaf takviyeli kompozitlerin kullanilecağı ürünlerin kısa ve uzun süreli performansına da etki ederek sektörde faydalı olması amaçlanmaktadır.

Gerçekleştirilen bu tez çalışması ile, farklı türdeki polimer bağlayıcılı karışımların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra bu karışımların ve elyaflı kompozitlerinin mekanik performansları kıyaslanmak suretiyle bu konudaki literatür için faydalı olacağı öngörülmektedir. Bu doğrultuda yapilen çalışmada, mevcut literatürdekinden farklı olarak; farklı türdeki polimer bağlayıcılı karışımların fiziksel, kimyasal ve termal analizlerinin yanısıra bunların mekanik performansına elyaf takviyesinin etkisi de araştırılmıştır. Ayrıca mekanik özellikleri en yüksek ve optimum sağlayacak olan elyaf takviyesi oranını belirlemek amacıyla farklı oranlarda cam elyafı takviyesinin karışımları hazırlanarak testleri gerçekleştirilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

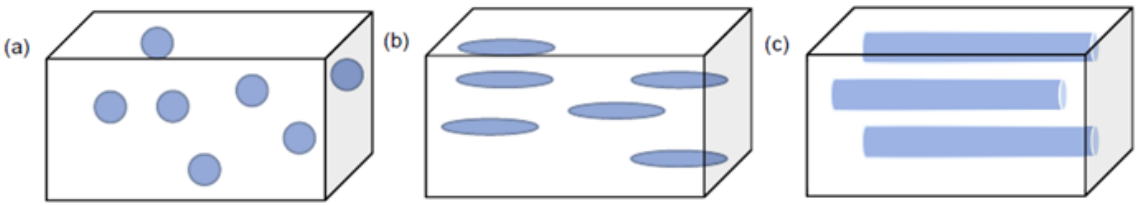
2.1. KOMPOZİT MALZEMELER VE HİBRİT YAPILER

“Gelişmiş kompozit malzemeler” olarak da adlandırilen güçlendirilmiş kompozit malzemeler, İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra, hafiflikleri, yüksek özgül sertlikleri, yüksek özgül dayanıklılıkları, mükemmel korozyon direnci, yorulma direnci ve darbe direnci gibi özellikleri nedeniyle yapısal mühendislik malzemeleri olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır. Ayrıca, karmaşık şekillerde üretilebilme özelliği sayesinde üretim esnasında ve montajda kullanilecak parça sayısını azaltırlar. Bütün bu nedenler, yüksek üretim maliyetine rağmen, konvansiyonel metal alaşımlarına kıyasla kompozitlere olan ilgiyi açıklamaktadır [16].

Kompozit piyasası geniş bir şekilde havacılık, ulaştırma, inşaat, boru ve tank, deniz, tüketici ürünleri (spor, eğlence), elektrik/elektronik ve rüzgar enerjisi sektörlerinde kullanılmaktadır. Küresel kompozit endüstrisinde, inşaat sektörü; hacimli sevkiyat anlamında en büyük kompozit malzeme tüketicisini temsil etmektedir. İnşaat sektörünün ardından nakliye ve elektrik/elektronik sektörleri önemli ölçüde kompozit malzeme tüketicisini temsil etmektedir. İnşaat sektörü, elyaf takviyeli kompozitler için en büyük potansiyel pazar olarak görülmektedir. Beton onarım ve güçlendirme, köprü güverte onarımı ve yeni kurulumu, kompozit hibrit teknolojisi (beton, ahşap ve çelik ile kompozitlerin kullanımı), deniz kazıklama ve iskele yükseltme programları şu anda araştırılmakta olan alanlardan sadece birkaçıdır [17].

Takviyeli kompozit malzemeler; metaller, polimerler, seramikler ve kompozitler olarak adlandırilen dört temel mühendislik malzemesi sınıfları [18] içinde kompozit malzeme sınıfının bir alt grubudur. Kompozit malzeme, bir veya daha fazla spesifik özelliği optimize etmek için bir araya getirilen ve farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla bileşenden oluşan çok fazlı malzeme olarak tanımlanır [16],[19],[20]. Takviyeli kompozit malzeme, sürekli matris fazı içinde takviye fazının da olmasıdır ve matris, takviyeyi yerine sabitleyerek, yük transferini ve dağıtımını sağlarken takviyeyi dış ortam koşullarından da korur. Tipik matris malzemeleri; termoset polimer, termoplastik polimer, metal, karbon ve seramiktir. Takviye, kompozit yapının sertlik ve mukavemet özelliklerini kontrol etmede önemli rol oynar. Takviye çeşitleri, kısa (süreksiz)

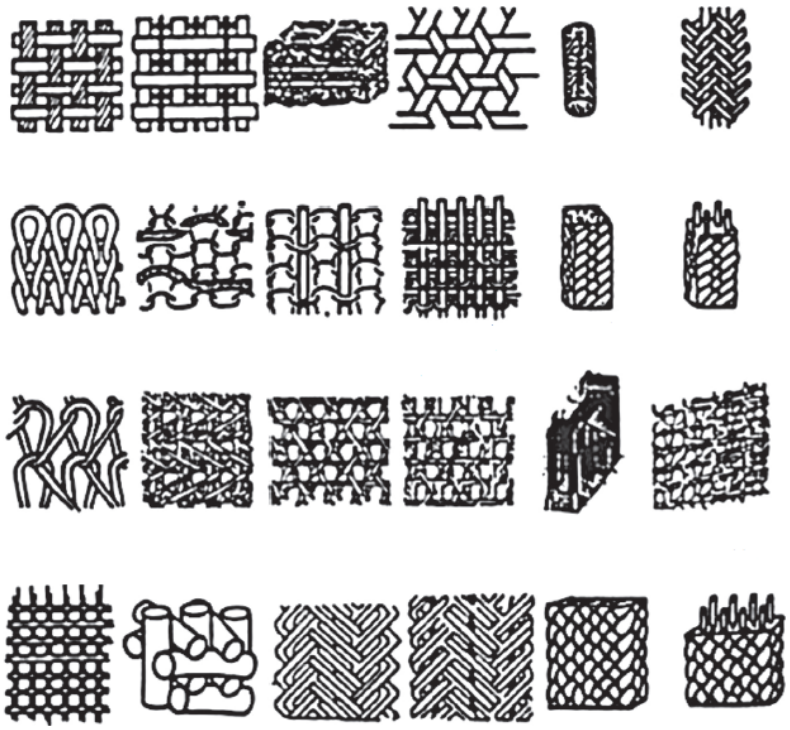
elyaflardan veya uzun (sürekli) elyaflardan yapilebilecek üç formda; Şekil 2.1'de gösterildiği şekilde, partikül, pul ve elyaflardan oluşabilir [16].



Şekil 2.1. Takviye çeşitleri (a) Parçacık, (b) Pul, (c) Uzun elyaf şeklinde.

Tipik olarak kullanılan elyaf malzemeleri karbon, cam, kuvars, metal, bor ve organik (doğal ve sentetik) elyaflardır. Ayrıca, sürekli elyaf takviyesi, nihai ürün uygulama koşullarına göre (ürünün destekleyeceği yüklerin tipi ve yönü) çeşitli formlarda ve yapıda özel olarak hazırlanabilir.

Literatürde imalat teknolojisine bağlı olarak kumaş takviyesinin yapısı için elyafların farklı hizalanma planları ve elyafların yönleri ile ilgili sınıflandırmalar getirilmiştir. Bu şekilde dokuma, örme, dikiş ve örgü gibi elyaf takviyeleri tasarlamak ve üretmek için Şekil 2.2'de gösterilen örneklerde olduğu gibi, geleneksel elyaf dokuma teknolojileri kullanılmaktadır [21]. Ayrıca özel şekilli kompozit üretmek için birçok yeni teknoloji de geliştirilmiştir [22].



Şekil 2.2. Elyaf dokuma çeşitleri.

Yapısal elyafların hizalama planları açısından, elyaf takviyeli kompozitler üç gruba ayrılır. Bunlar; elyafların bir yönde paralel ve hizalı olduğu tek boyutlu elyaf takviyeli kompozitler, elyafların yapının bir düzlemine (XY düzlemi) hizalandığı iki boyutlu elyaf takviyeli kompozitler ve elyafların yapının bir düzlemindeki (XY düzlemi) hizalı elyaflara ek olarak, başka bir elyaf setinin, yapının kalınlık eksenine karşılık gelen dikey eksen (Z ekseni) boyunca hizalandığı takviye veya elyafları de içeren üç boyutlu elyaf takviyeli kompozitlerdir. Yapısal elyafların ana ekseninin oryantasyonu ile ilgili olarak, elyaf takviyeli kompozitler; tek eksenli, çift eksenli, üç eksenli ve çok eksenli yapı olarak sınıflandırılırlar [21].

Elyaflarla güçlendirilmiş plastikler (FRP), çeşitli endüstrilerdeki sayısız güçlendirme uygulamaları için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, köprü bileşenleri için yaygın olarak kullanılan uygulamalar, kirişler, sütunlar ve köprü güverteleri üzerine dışarıdan bağlanmış kompozit kumaşlar içermektedir [23].

Elyaf takviyeli kompozitler, onları birçok geleneksel mühendislik malzemesine alternatif yapan bir dizi yapısal özellik gösterir. Çekme mukavemeti, yumuşak çeliğin mukavemeti civarında ve öngerilmeli çeliklerin mukavemetinden daha iyi olabilir. Ancak malzemeler arasında karşileştırma yapmak için kullanılan spesifik mukavemet değerleri yüksek mukavemetli çeliğinkinin 40-60 katı olabilir [24].

Bu özellikler, kaplama panelleri ve düşük yoğunluklu çerçeveleme malzemeleri gibi uygulamalarda büyük önem kazanmaktadır. Düşük ağırlıkları sayesinde, yapileın montajını ve sökülmesinin ahşap veya çelikten yapilen benzer yapilera göre çok daha kolay ve daha az zamanda yapılmasını sağlamaktadır. Köprüler düşünüldüğünde, yapı ve temeller boyunca tasarruf sağlayabilecek düşük ağırlıklar avantaj sağlamaktadır. Bir FRP köprü güvertesinin dayanımı, betonarme bir güvertenin yapısal eşdeğerinin %20'sine kadar çıkabilir [25]. Ayrıca, spesifik kompozit modülü de yüksektir ve bu özelliğin önem arz ettiği durumlarda titreşimlerin etkili bir şekilde sönümlenmesini sağlayabilir. Bir malzemenin sönümleme ölçüsü, sönümleme faktörüdür ve genel olarak, elyaf takviyeli kompozitler, metallerden daha yüksek bir sönümleme faktörüne sahiptir [26].

Polimerik kompozitler gelişmiş kompozitler ve mühendislik kompozitler olarak iki gruba ayrilebilir. Bunlar, esas olarak elyaf takviyesinin tipi ve uzunluğu ile kullanılan reçinelerin performans özelliklerinde farklılık gösterirler. Mühendislik ve gelişmiş

kompozitlerin malzeme teknolojilerindeki farklılık ve benzerliklerin bir özeti Çizelge 2.1'de verilmiştir [27].

Çizelge 2.1. Kompozit malzeme teknolojilerinin karşılaştırılması.

Özellik	**FRP Kompozitler**	**Gelişmiş Kompozitler**
Elyaf Takviyesi	Ağırlıklı olarak E-cam ürünleri Korozyon için C-cam kullanımı E ve C camının korozyon versiyonları Sınırlı "doğal" elyaf kullanımı Elyaf takviyeli plastikler Cam takviyeli plastikler Cam elyaf takviyeli plastikler	Yüksek mukavemetli S camı (R ve T cam versiyonları) Karbon ve grafit Aramid, Bor Kuvars (erimiş silika) Polietilen Gelişmiş polimerik elyaflar Seramik elyaflar
Tipik Elyaf Formları	Sürekli cam elyafı ve doğranmış elyaflar Dokuma elyaf ürünleri Sıkı cam dokuma kumaşlar Cam tülü malzemeleri Ticari mat ve dikişli/yapıştırılmış malzemeler	Sürekli elyaf fitili ve çekme malzemeleri Hazırlık malzemeleri (tek yönlü bantlar ve kumaşlar) Daha yüksek elyaf hacimleri (%55-%65) Karmaşık yapısal dokuma ürünleri
Matris Reçine	Polyester ve vinilester Çok çeşitli polyester formülasyonları Yangın uygulamaları için fenolikler Belirli alanlarda sınırlı epoksi kullanımı Tüm termosetler-bazı cam elyaflı termoplastikler hariç	Epoksiler Bismaleimide (BMI) ve daha yüksek sıcaklıklar için siyanat esterleri poliimitler Çok sayıda yüksek performanslı termoplastikler Sertleştirilmiş reçine sistemi
Uygulama sıcaklığı ve koşulları	Ortam sıcaklığı aralığı (4-60 °C) UV ve hava şartlarına maruz kalma Yakıtlara, atık maddelere, suya, deniz suyuna ve işlem kimyasallarına maruz kalma	Geniş sıcaklık aralığında maruz kalma Uzay ortamları Havacılık hizmeti koşulları Yakıtlar, çözücüler, sıviler Aşırı koşullar: 82 °C–371 °C çevre koşulları Kriyojenik koşullar
Kor (çekirdek) malzeme kullanımı	Balsa ve köpük çekirdek malzemeleri Yakın ortam koşullarına uygun çekirdek malzemeler Deniz ve tekne pazarına dayanan temel kullanım teknolojisi	Petek çekirdek malzemelerin yoğun kullanımı Alüminyum Aramid Karbon elyafı Kapsamlı tasarım ve üretim teknolojisi

FRP kompozitler yükü taşıyıcı elyaflar ve elyafların bağlayıcı ve koruyucusu olarak görev yapan polimerik matris olmak üzere iki ana bileşenden oluşurlar. Matris, elyaflar arasında yük transferini kolaylaştırır ve gömülü elyafların oryantasyon ve yön stabilitesini korumasını sağlar [28]. Kompozitler genellikle üç ortogonal yönde farklı mekanik özellikler sergileyen anizotropik yapıdadırlar. FRP kompozitlerin özellikleri, kullanılan imalat ve üretim işlemlerine bağlı olarak bir miktar değişiklik göstermektedir

[29]. Kompozitlerde matris ve elyaf takviyesinin rolleri Çizelge 2.2'de özetlenmiştir [27].

Çizelge 2.2. Kompozitlerde matris ve takviye rolleri.

Matris	Takviye
• Kompozit parçaya şekil verir • Elyaf takviyesini çevre koşullarından korur. • Yükleri elyaflara transfer eder. • Hem matrise hem de elyaflara bağlı olan dayanım gibi özelliklere katkıda bulunur.	• Kompozit malzemeye kuvvet, sertlik ve diğer mekanik özellikleri kazandırır. • Termal genleşme katsayısı, ve termal iletkenlik gibi diğer özelliklere hakim olmayı sağlar.

Sivil yapilerın dayanması gereken yükleme türleri arasında, yorulma yüklemesi önemli bir rol oynamaktadır. Bir malzemenin yorulma özellikleri, döngüsel yüklemeye yanıtını temsil eder ve kuvvetin döngüsel yükler altında önemli ölçüde azaldığı iyi bilinmektedir. Bu tür yüklemelere verilen yanıt karmaşıktır ve stres seviyesi, tekrarlama modu, malzeme bileşimi, çevresel koşullar ve benzeri gibi çeşitli değişkenlerden etkilenir. Elyaflarla güçlendirilmiş kompozitler nadiren bir çatlak yolu boyunca kusur sergilerler. Bunun yerine, yorgunluk hasarı, elyaf kırılması, delaminasyon (tabakalar arası ayrılma), bağlanma ve matris çatlaması şeklinde birçok yerde kusur meydana gelebilir. Stres seviyesine, elyaf oryantasyonuna ve bileşen özelliklerine bağlı olarak, bu kusur/başarısızlık modlarının bazıları, kompozitin kusurlu olmasına neden olmadan hemen önce tek başına ya da tümü bir arada ortaya çıkar ve kusurda yırtılmaya kadar ilerleyen bir büyümeye neden olur. FRP kompozitleri ile çalışırken, gerilmeler ve birim deformasyonlar arasında bir faz farkına neden olan polimerlerin viskoelastik yapısı ve düşük ısı iletkenliği nedeniyle kolay bir şekilde dağılmadığı ve böylece polimer kompozitlerin merkezi ve yüzeyleri arasında bir sıcaklık farkı yaratan, malzeme içindeki ısı olarak enerji yayılmasına neden olan özellikleri dikkate alınmalıdır. Bu sıcaklık gradyanı kompozitlerin yorulma ömrünü azaltabilmektedir [30].

Kompozit malzeme teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, kompozitler sanayi ve teknoloji uygulamalarında gittikçe artan oranlarda kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle uçak sanayisinde ve daha pek çok sektörde önemli ölçüde kullanılan kompozitler

üzerindeki bilimsel çalışmalar günümüzde yoğun bir şekilde devam etmektedir. Kompozit malzemeler yapileri ve özellikleri sayesinde çok çeşitli alanlarda kullanılır. Her sektörün farklı ihtiyaçları ve beklentileri olduğundan, kompozit malzemelerin, ürün esneklikleri önemli bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Kompozitler, farklı sektörlerde hammadde olarak kullanıldığı gibi imalat yardımcı ekipmanları olarak da kullanılırlar. Uzay teknolojisi, denizcilik sektörü, tıbbi cihazların imalatı, robot teknolojisi, kimya sanayisi, elektrik-elektronik teknolojisi, müzik aletleri endüstrisi, inşaat ve yapı sektörü, otomotiv sektörü, savunma sanayi ve havacılık sektörü, gıda ve tarım sektörü, spor malzemeleri imalatı (yüksek atlama sırıkları, tenis raketleri, sörf, yarış tekneleri, kayak vs.) gibi pek çok alanda kullanılmaktadır [31].

Hibridizasyon, rekabet halindeki ve çeşitli tasarım gereksinimlerini geleneksel mühendislik malzemelerine kıyasla daha uygun maliyetli bir şekilde karşilema yaklaşımıdır. "Hibrit kompozitler" terimi, geliştirilmiş mekanik özellikler gibi sinerjik bir etki sağlamak için, tek bir matristeki takviye edilmiş en az iki farklı tipte elyafı veya tek bir elyaf ile güçlendirilmiş polimer karışımlarını içeren bir bileşiği ifade eder [32]. Hibrit kompozitler dengeli termal stabilite, düşük ağırlık/maliyet, dengeli dayanım ve sertlik, daha iyi yorulma direnci, darbe dayanımı, kırılma tokluğu sunmuştur [33]. El yatırması, kompresyon kalıplama, reçine transfer kalıplama (RTM) gibi çeşitli teknikler kullanilerak; mekanik, termal, fiziksel ve alev geciktirici özellikleri geliştirmek amacıyla üretilmiş doğal/sentetik elyaflarla takviye edilmiş epoksi hibridizasyonu üzerine çeşitli çalışmalar bildirilmiştir [34].

2.2. KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİNDE KULLANILAN ELYAFLAR

Kompozit malzemelerde güçlendirici elyaf olarak endüstriyel kullanımda temelde büyük ölçüde önem taşıyanlar; cam ve karbon ve aramid elyafı olarak listelenebilir. Son zamanlarda bazalt elyafları ticari olarak temin edilebilir hale gelmiştir. Bazalt elyafları volkanik bazalt kayaçlarından üretilir ve mükemmel termal ve kimyasal dirence sahiptir. Uygulamalar hala çok başlangıç döneminde olmasına rağmen, bazalt elyafları, çok düşük maliyetlerinden dolayı karbon elyafı değiştirme konusunda büyük potansiyel göstermektedir. Kullanılan elyaf türünden bağımsız olarak, her biri farklı derecelerde ve değişken özelliklerde mevcuttur. Genel olarak, karbon elyafları en yüksek esneklik modülüne sahipken, cam elyafları en düşük değerlere sahiptir. Tüm elyaf tipleri test edildiğinde doğrusal elastik davranış sergilerler [1].

Elyafın en önemli özelliği elastikiyet modülüdür, matristen önemli ölçüde daha sert olması gerekir. Bu, kompozite uygulanan gerilmeyi almasını sağlar. Elyaf stresi taşımaya çalıştığından, yeterli güce ve yüksek mukavemete sahip olması gerekir. Mesele şu ki, elyafın sertliği yetersizse tek başına yüksek dayanımın değeri yoktur.

Takviye elyafları sınırsız çeşitlilikte yönlendirilebilir, ancak kullanımda üç ana kategori vardır. Bunlar:

• Çok Yönlü Dağılım: Tüm elyafların bir yönde uzandığı dağılımdır.

• Tek Yönlü Dağılım: Elyafların birbirlerine 90 derece yatmalarıdır. Bu, ya dokuma kumaş, dokuma olmayan kumaş kullanımı ya da her biri tek yönlü fakat ardışık olarak 90 derecede döşenen ayrı elyaf katmanları kullanilerak gerçekleştirilir.

• Rastgele (düzlem içi izotropik) Dağılım: Elyafların rastgele dağıldığı ve düzlem içinde olduğu dağılımdır.

2.2.1. Cam Elyafları

Cam elyafları, mekanik özellikleri ile düşük maliyeti sebebiyle kompozit malzeme endüstrisinde %95'e yakın pazar payına sahiptir. Mükemmel bir mukavemet sergiler, fakat karbon elyaflara kıyasla nispeten düşük modül ve daha yüksek özgül yoğunluk özelliği gösterirler. Çok iyi işleme özelliklerine sahipler ve daha az maliyetlidirler. Belirli cam elyaf türlerinin işleme karakteristikleri, doğranma kabiliyeti, düşük statik elektriklenme, karmaşık şekle uyumluluk ve hızlı ıslanma, elyaf/matris yapışması, reçine uyumluluk gereksinimleri vb. gibi gerekli performansı elde etmek için uzun yıllar boyunca modifiye edilmiş ve optimize edilmiştir [35].

1940'lı yıllarda GRP endüstrisinde kullanilebilen tek elyaf "A" cam elyafı idi. Bu elyaf, reçine ile cam arasındaki bağlayıcı madde olarak bir silen veya bir krom yüzey kaplamasına sahipti. Birçok uygulamada iyi performans göstermesine rağmen, ancak ıslak koşullarda önemli bir güç kaybı gösterdi. Daha sonra 'E' camı; performansı artırmak ve özellikle elektriksel özelliklerini geliştirmek için geliştirilmiştir. Her iki cam türü de belki de on yıl boyunca mevcut iken; ekonomik koşulların, genel amaçlı işler için yalnızca bir tür camın sürdürülebileceğini ve bunun 'E' camı olması gerektiğini ortaya koyulduktan sonra, 1960'larda neredeyse tüm dünyada "A" cam üretimi durmuştur. Hiçbiri mükemmel olmayan kompozit malzemelerin üretimi için mevcut olan çeşitli cam elyaf tipleri arasında önemli farklılıklar vardır. Her birinin kendi

faydaları ve sakıncaları vardır bu nedenle uygulama koşullarına en uygun olanı seçme gereksinimi vardır [36].

Geniş yelpazede bir genelleme yapılırsa; cam elyaflar 70 GPa civarında bir modülü olan ve düşük ile orta dayanıma sahip (yani E, A, C, ECR) olanlar ve daha yüksek mukavemetli 85 GPa civarında bir modülü olanlar (yani R & S2 camı) şeklinde iki gruba ayrilebilirler. Cam elyafının yoğunluğu, diğer takviye edici elyaflara kıyasla yüksek fakat metalik standartlara göre çok düşük (alüminyum, yaklaşık 2,8 ve çelik 7,8'lik bir yoğunluğa sahiptir) olacak şekilde yaklaşık 2,5 g/cm^{3}'dür. Tipik bir E ve ECR cam elyafının kimyasal bileşimi Çizelge 2.3'te, benzer şekilde cam elyafı tiplerinin kimyasal bileşiminin kıyaslanması ise Çizelge 2.4'te verilmiştir [37].

Çizelge 2.3. E ve ECR cam elyafının kimyasal bileşimi.

Bileşenler	**Bileşim %**	
	E Camı	**ECR Camı**
SiO_2	52-56	52-56
Al_2O_3	12-16	10-15
B_2O_3	5-11	-
CaO	15-25	18-25
MgO	0-5	0-5
$Na_2O + K_2O$	0,5-2	0,5-2
Fe_2O_3	0,05-0,5	0,05-0,5
ZnO	-	2-5
TiO_2	0-1	0-3

Çizelge 2.4. Farklı cam elyaf tiplerinin kimyasal bileşimi.

Cam elyafı derecesi	A (Yüksek Alkali)	C (Kimyasal)	E (Elektriksel)	S (Yüksek Mukavemet)
Bileşenler	72,0	64,6	54,3	64,2
Silisyum Oksit	0,6	4,1	15,2	24,8
Demir Oksit	-	-	-	0,21
Kalsiyum Oksit	10,0	13,2	17,2	0,01
Magnezyum Oksit	2,5	3,3	4,7	10,27
Sodyum Oksit	14,2	7,7	0,6	0,27
Potasyum Oksit	-	1,7	-	-
Bor Oksit	-	4,7	8,0	0,01
Baryum Oksit	-	0,9	-	0,2
Diğer	0,7	-	-	0,2

Camın ana bileşenleri kum, kireçtaşı ve kildir. İçerikler karıştırılır, ince bir şekilde öğütülür ve sonra bir fırına (tank) verilir. Tankın sıcaklığı yaklaşık 1500 °C'dir ve burada erimiş cam oluşturmak için malzemeler eritilir. Deponun dibinde, binlerce minik deliğe sahip burçlar olarak bilinen platin yüzükler bulunur. Erimiş cam, bir araya getirildiği bu deliklerden dökülür ve buradan çekilerek ve gerilerek gerekli filement çapına getirilir. Hava ve su vasıtasıyla soğutulur ve filementleri katileştırılır. Filementler, boyutlandırma olarak adlandırilen sulu bir kimyasal karışımla kaplanır. Bu işlem camı ciddi bozulmalardan korur. Ayrıca, kompozitin üretimi için gerekli olan ve kompozitin kullanımdaki özelliklerinin çoğuna ulaşması için gereken özelliklerin birçoğunu verir [38].

Filementler bir iplikçik halinde toplanır ve filement sarımı, ilgili imalat prosesinde kullanılmak üzere kısa uzunluklarda kesilebilir veya bir bobine sarılması için cam elyaf kumaş olarak kullanilebilir.

Takviye malzemeleri, karşileşılması en muhtemel olan proseslere ve tasarım gereksinimlerine uyacak şekilde çeşitli formatlarda mevcuttur. Tek yönlü, çift yönlü ve rastgele yapilendırılmış olarak sınıflandırilebilirler.

Cam elyafların en popüler uygulama alanları: inşaat ve nakliye, spor malzemeleri ve elektronik cihazlar şeklindedir. Cam elyaf içeren kompozitlerin genel üretimi Fransa ve İspanya'da durgun seyrederken, İngiltere ve Almanya'da özellikle otomotiv ve inşaat endüstrisi alanlarında artmaktadır.

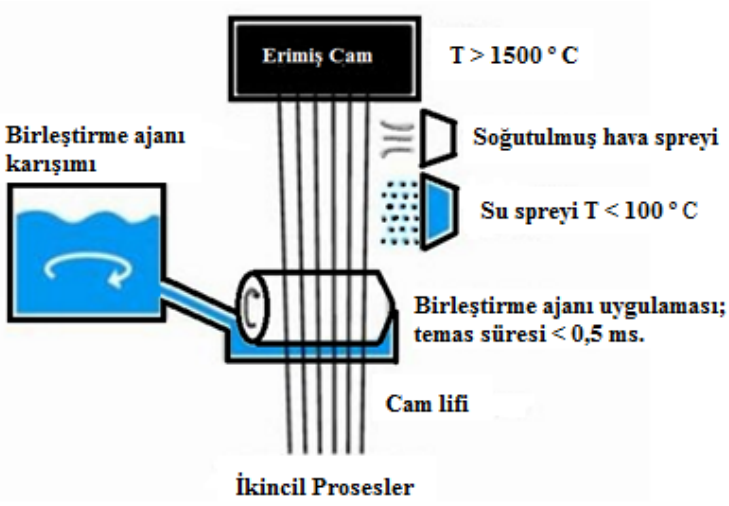
Çizelge 2.5'te görüleceği üzere cam ve karbon elyaf mekanik ve morfolojik özellikler açısından farklılıkları göstermektedir. 2016 yılında dünya cam elyaf esaslı kompozitlerin toplamı yaklaşık 2.2 milyon ton olup, bunun çoğunluğu düşük maliyeti ve enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon gibi geleneksel polimer işleme yöntemlerini kolayca kullanma imkanı nedeniyle 1,2 milyon ton kesilmiş elyaf takviyeli polimerden oluşmaktadır [39].

Çizelge 2.5. Cam ve karbon elyafı arasındaki farklar.

Özellik	Birim	E-Cam Elyafı	S Cam Elyafı	Karbon Elyafı
E Modülü	GPa	72-78	88-91	230-600
Dayanım	MPa	2600-3800	4380-4590	3500-6000
Uzama	%	4,5-4,9	5,4-5,8	1,5-2
Çap	mikron	6-21	6-21	5-15
Yoğunluk	g/cm^3	2,54-2,55	2,48-2,49	1,79
Maliyet	US$/kg	1,1	1,5	20-30

2.2.1.1. Cam Elyaf Kaplama Malzemeleri

Takviyeli plastiklerde kullanılan tüm cam elyaflar yüzeyde bir bağlayıcı maddeye sahiptirler. Camın inorganik yapısından dolayı, reçine matrisini (organik) cam yüzeye (inorganik) bağlamak için birleştirme maddeleri kullanılır. Organosilenlar, cam elyaf endüstrisinde tercih edilen birleştirme ajanlarıdır. Bu moleküller küçük olsalar da etkilidirler. Bu birleştirme maddesi, inorganik (cam) ve organik (reçine matrisi ve eski film) yüzeyleri bağlar. Cam elyafı üreticileri, elyaf oluşturma işlemi sırasında ince filementler halinde toplandığında hava ve su spreyleri ile soğutulur. Bundan hemen sonra, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi cam elyafına birleştirme maddesi uygulamaktadır [40].



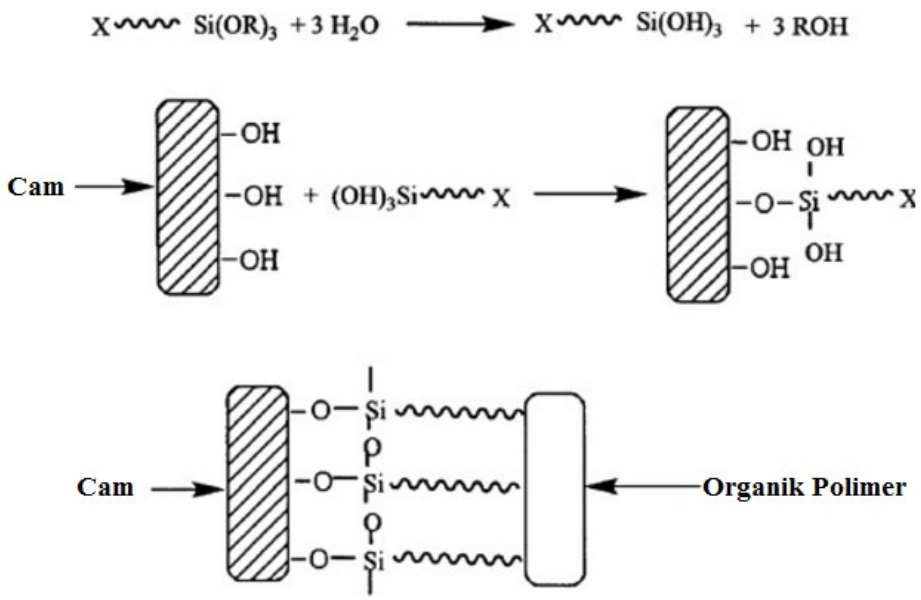
Şekil 2.3. Cam elyafı üretimi sırasında kaplama uygulama diyagramı.

Organosilenlar tercih edilen bağlama ajanlarıdır ve ayrı ayrı veya iki veya üç bileşiğin bir karışımı olarak kullanilebilir. Bunlar; film oluşturucu polimer, cam kayganlaştırıcı, antistatik madde ve diğer bileşenler de dahil olmak üzere birkaç adettir. Ancak en kritik bileşen, %0,1-%0,5 silen bağlama maddesidir. Bağlama ajanı su bazlı olduğundan (cam elyaf endüstrisinde önemli bir gereklilik), kullanılan herhangi bir silen suda çözülebilir olmalıdır. Çoğu silenın suya eklenmesi sonucunda, hidroliz ve çözünmeyen hidrofobik siloksan yapilerının oluşumu yoluyla çökeltilmiş bir jel oluşturacaktır. Ancak, su asetik veya formik asit ile pH değeri 4 e getirilirse, silen birleştirme ajanı, özellikle %5'in altındaki konsantrasyonlarda, jelleşmeden su içinde hidrolize olur ve çözülür. Düşük pH silenın çözünmesini ve çözünür kalmasını sağlamak için silenol türlerini yoğunlaşmaya karşı stabilize edecektir. Aside duyarlı epoksisilenlarla daha yüksek bir pH 5-6 kullanılır. Aminosilenlar gibi hidrofilik silenlar tüm pH seviyelerinde sulu çözeltiler oluşturacaktır, fakat cam yüzeyinde doğru oryantasyonu vermek için cam işlemede pH 4 olarak tercih edilmektedir. Bir bağlama ajanının, kompozitlerin mukavemet özelliklerini iyileştirmedeki etkisi önemlidir [41].

Kimyasal yapileri, R' fonksiyonel grubunun etkili bir birleştirme maddesi olabilmesi için matris reçinesi ile uyumlu olması gereken R'-Si-$(OR)_3$ ile temsil edilir. Cam elyaf yüzeyi sulu çözeltide silenlarla muamele edilir. Bir silen suya eklendiğinde, R'-Si-$(OH)_3$ 'ü oluşturmak için hidrolize edilir;

R’-Si (veya) 3 + $3H_2O$ → R’-Si $(OH)_3$ + 3HOR

Cam elyafı bir bağlama maddesiyle işlemden önce, yüzeyinin şekillendirme sırasında uygulanan boyuttan temizlenmesi gerekir. Fiber, hava sirkülasyonlu bir fırında 340˚C'de 15-20 saat ısıtılarak yakılır. Isıyla temizlenmiş elyaflar bir silenın sulu çözeltisine daldırılırken, cam elyaf yüzeyinde (alkali içeriği nedeniyle hidroskobik olan) ve R'-Si $(OH)_3$ molekülleri (OH) grupları arasında Şekil 2.4’te gösterildiği gibi kimyasal bağlar (Si-O-Si) ve fiziksel bağlar (hidrojen bağları) bulunur [42].



Şekil 2.4. Cam elyafı kaplama maddesiyle işlemden geçirme.

2.2.2. Karbon Elyaflar

Karbon elyaflar, yüksek sertlik ve yüksek mukavemet elde etmek için kullanılan en önemli takviyelerdendir. Karbon elyaf terimi, geniş bir dayanım ve sertlik yelpazesini kapsamaktadır.

Mükemmel mekanik özellikleri ve hafif olmalarına rağmen düşük yoğunluklu olmaları sebebiyle, karbon elyaflar çoğunlukla uzay, askeri ve bazı tıbbi ve spor uygulamalarındaki yüksek kaliteli ürünlerde kullanılmaktadır. Bu sebeple nispeten yüksek maliyete sahiptirler. Bununla birlikte, yeni çevresel düzenlemelerde, ulaştırma alanındaki gaz emisyonunu azaltmanın temel çözümü olarak arabaların, kamyonların, uçakların ve hatta trenlerin ağırlığını azaltmak için de kullanılmaktadırlar. Bu amaç doğrultusunda metalik parçaları kompozit parçalarla değiştirmek ve hibrit metalik kompozit parçaların gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Amerika Birleşik Devletleri, Batı Avrupa ve Japonya havacılık ve savunma sanayii ile ilgili önde gelen karbon elyaf takviyeli kompozit piyasalarına sahiptir. Batı Avrupa ülkelerinde havacılık ve savunma, otomotiv ve rüzgar değirmenleri endüstrisi olmak üzere üç ana pazar vardır. Japonya, hammadde olarak ana karbon elyaf üreticisi ve üçüncü büyük karbon elyaf bazlı kompozit pazarıdır. Öte yandan, Çin rüzgar enerjisi ve havacılık ve askeri uygulamaların gelişmesi nedeniyle çok hızlı büyüyen bir pazardır [39].

Karbon elyaf kullanımında sanayinin asıl sorunu, kilogram karbon bileşiğinin kilosu başına gereken maliyetinin diğer elyaflara göre çok fazla olmasıdır. Karbon elyaf üretimini artırabilecek ve fiyatı düşürebilecek olası çözümler arasında otomotiv uygulamaları için yeterince düşük maliyetli karbon elyaflar için tedarik zincirinin geliştirilmesi; otomobil üreticileri ve karbon elyaf üreticileri arasındaki stratejik ittifaklar ve ortak girişimlerin organizasyonu gibi konular olabilir [43].

2.2.3. Aramid Elyaflar

Aramid elyafları genellikle oldukça yüksek mukavemet, orta modül ve çok düşük bir yoğunluğa sahip olmaları ile karakterize edilir. Aramid elyaf kompozitleri, bir taraftan karbon elyaf ailesinin bıraktığı gerilme eğrilerine ve diğer taraftan cam elyafların aralarındaki boşluğa iyi uyum sağlarlar. Aramid elyafları yanmaya karşı dayanıklıdır ve yüksek sıcaklıklarda iyi performans gösterirler. Hem elektrik hem de ısı yalıtkanlarıdır. Organik çözücülere, yakıtlara ve yağlama maddelerine karşı dayanıklıdırlar. Aramid elyafların büyük bir farklılığı, bileşik olmayan formlarında oldukça hassas olmaları ve hem karbon hem de cam elyaflarında olduğu gibi kırılgan davranmamalarıdır.

Aramid elyaflarının gerilme eğrisi temelde kusura karşı doğrusaldır. Elastikiyet modüllerinin yaklaşık olarak cam elyafı ile aynı 60-70 GPa olduğu ve bu seviyenin yaklaşık iki katı bir modüllü olduğu iki ayrı kategorileri vardır. Genellikle kompozitlerde kullanım alanı bulabilen daha yüksek modüllü malzemelerdir. Özellikle balistik uygulamalarda, yüksek dayanım sağlanması gerekli olduğu durumlarda, kompozitlerdeki uygulamalara sahiptir. Aramidlerin spesifik performansı, dayanım/ağırlık ve sertlik/ağırlık oranları birincil avantajlarıdır. Aramidin yoğunluğu, 1,39-1,44 aralığında olduğu için, yüksek modüllü aramidler, bazı karbon elyaflarından ve tüm cam elyaflarından daha yüksek spesifik modüllere sahip olabilir [44] ve orta ile ultra yüksek mukavemet, orta ile düşük uzama ve orta derecede yüksek ile ultra yüksek modül ile karakterize edilirler [45].

Çok düşük yoğunluklu, yüksek gerilme mukavemeti ve yüksek mukavemeti, aramid elyaflarını "kuru" bir kumaş veya bir kompozit olarak balistik uygulamalar için oldukça uygun kiler. Bazı aramidlerin nispeten çok düşük bir basınç dayanımı olduğu belirtilmelidir. Bu nedenle, sıkıştırma veya bükülmede kullanıldığında özel dikkat gerektirirler.

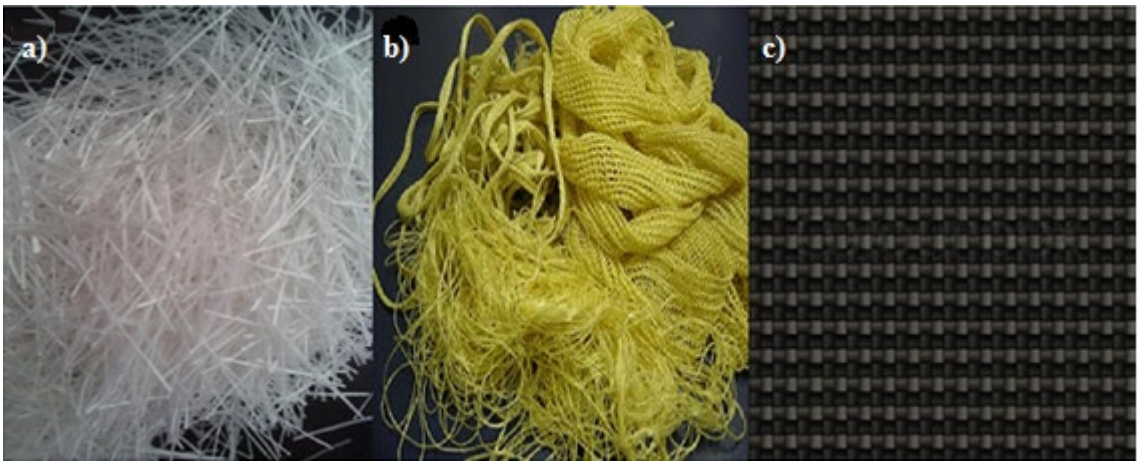
Aramid ipliğinin kopma mukavemeti 3045 MPa, diğer bir deyişle çelikten beş kat daha fazla (su altında, aramid dört kat daha güçlüdür) ve cam elyaf veya naylondan iki kat daha fazladır. Yüksek mukavemet, aromatik ve amid grubunun ve yüksek kristalliğin bir sonucudur. Aramid, 300 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda dayanım ve modül değerini korur. Aramid elyaf uygulamaları eşyaları, uçaklar, askeri araçlar ve diğerleri gibi kompozitlerde güçlendirme ve yangından korunma giysileri veya kurşungeçirmez yelekler gibi giysilerdeki kumaşlar kategorisinde kullanılır. Aramid elyaflar ileve olarak; koruyucu eldivenler, kasklar, vücut zırhı, basınçlı kaplar, alev ve kesime dayanıklı giysiler, halatlar, kablolar, tenis raketi telleri ve hokey sopaları gibi ürünlerde de kullanılmaktadır [46].

Son yıllarda REACH (Kimyasalların Tescili, Değerlendirilmesi, Yetkilendirilmesi ve Kısıtlanması) uygulamasının çevre düzenlemesi, halen esasen zırhlar ve kasklar gibi bazı askeri ve güvenlik uygulamaları için kullanılsalar bile, aramid elyafların kullanımını önemli ölçüde kısıtlamıştır [47].

2.2.4. Kevlar Elyaflar

Para-fenilendiamin ve tereftaloil klorür kombinasyonu sonucu, aromatik poliamid (aramid) iplikleri veya Kevlar oluşur. Kevlar elyafları, pahalı üretim süreci ve maliyetli özel ekipman gerektirmesi nedeniyle oldukça pahalıdır. Kevlar, Kevlar 29, Kevlar 49 olmak üzere üç ana tipte mevcuttur.

Kompozit endüstrilerinde kullanılan en yaygın üç sentetik elyaf olan, Kevlar (aramid), karbon ve cam elyafı Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Elyaf görselleri a) Cam elyafı, b) Kevlar elyafı ve c) Karbon elyafı.

2.2.5. Doğal Elyaflar

Biyo bazlı elyaf takviyelerine ve/veya biyo bazlı matrise sahip olan biyo kompozitler pazarı, özellikle Avrupa'da, hızla büyümektedir. Bu kompozitler iki ana kategoride sınıflandırilebilirler: ahşap plastik kompozitler (WPC) ve doğal elyaf kompozitleri (NFC). ABD ve Kanada ile Kuzey Amerika, inşaat endüstrisinde zemin kaplaması, dış cephe kaplaması ve eskrim ile ilgili temel uygulamaları olan WPC'lerin ana pazarıdır. NFC'ler ise Avrupa pazarında otomotiv uygulamaları için baskındır [48].

Bu pazarın büyümesinde en büyük itici güç otomotiv, inşaat gibi çeşitli uygulamalarda hafif ve çevresel açıdan sürdürülebilir kompozit malzemelere olan talebin artmasıdır. Yolcu güvenliği konusundaki endişelerin artması, devletin daha iyi yakıt ekonomisi talep etmesi ve kullanım ömrü sonu direktifleri ve çevresel olarak sürdürülebilir kompozit malzemelerin yüksek kabulü gibi sebepler bu segment için büyümeyi hızlandıran başlıca itici güçlerdir [49].

Doğal elyaflar arasında, keten, kenevir ve kenaf doğal elyafları, belirli modül ve dayanım gibi iyi mekanik özelliklerinden dolayı cam elyafları yerine potansiyel kompozit takviye malzemesi olarak kabul edilebilmektedir. Doğal elyaf kalitesinin doğal değişkenliğini ve bunların matris polimerleri ile zayıf uyumluluğunu geliştirmeye yönelik çözümler bulmaya yönelik bilimsel çalışmalar yürütülmektedir. Bununla birlikte, zayıf kullanım ömrü ve oldukça düşük termal stabilite gibi özellikleri, gelecekte doğal elyafların kompozit yapilerda kullanımı ile ilgili ele alınması ve araştırılması gereken önemli konulardandır [50].

2.3. KOMPOZİT MALZEMELERDE MATRİSLİ YAPILER

Kompozit endüstrisinde matris olarak pek çok reçine türü kullanılır, ancak termoset reçineleri piyasaya hakimdir. Epoksiler, vinilesterler, doymamış polyesterler ve fenolikler, yüksek performanslı güçlendirici elyaflarla birlikte kullanılan en yaygın polimerik matris malzemeleridir [51].

Polimerler, molekülleri birkaç türden ve çok sayıda birimlerden oluşan maddelerdir: bir dizi atomdan oluşan birimlerin kendilerine genellikle polimerin bölümleri denir. İki monomerin bir karışımının polimerizasyonunda, her bir makromolekülün yapısı, her iki monomerin birimlerini içerir. Böyle bir polimer kopolimer olarak adlandırılır ve sentez işlemine kopolimerizasyon denir. Polyesterler çok yönlü sentetik kopolimerlerden

biridir. Polyesterler, dünya çapında yılda 30 milyar lirayı geçen yüksek hacimlerde üretilmektedir [52]. Ticari olarak elyaflar, plastikler, kompozitler ve kaplama uygulamaları için de yaygın olarak kullanılmaktadırlar [53].

Bu termoset reçineler arasında, polyester reçinesi kullanımı hacim bazında en yüksektir, oysa vinilester kompozitlerin kullanımı daha sınırlıdır. Şu anda doymamış polyesterler kompozitlerin yapımında en yaygın kullanılan polimerlerdir. Nispeten düşük maliyetli malzemelerdir, işlenmesi kolaydır ve ortam sıcaklığında sertleştirilmiş bir malzemedir. Yapı yapımında yaygın olarak kullanılan en temel iki tip polyester; ortoftalik ve izoftalik reçinelerdir. Her ikisi de ortam koşullarında kürlenen reçinelerdir, ancak yüksek sıcaklıktaki kürden faydalanırlar. Ortoftalik reçineler en yaygın kullanılan reçinelerdir ancak düşük termal stabiliteye ve kimyasal dirence sahiptir. Temel bir bileşen olarak izoftalik asitler içeren izoftalik reçineler, üstün kalitededir ve daha iyi kimyasal ve termal direnç sergilemenin yanında iyi bir alev direnci derecesine sahiptirler. Yaygın polyesterler, zincir uçlarında reaktif gruplara sahip düşük moleküler ağırlıklı polihidroksieter zincirlerini içerir [54].

Monomerik formdaki stiren, reçinede %20 ile %60 arasında bir miktarda reaktif seyreltici olarak kullanılır. Bununla birlikte, stiren içeriğindeki artışın; hidrofobiklikte bir artışa yol açtığını, dolayısıyla nem emme seviyesini etkili bir şekilde azalttığını ve hacimce %5-%19 seviyelerinde büzülme artışına sebep olduğunu vurgulamak önemlidir. Bu, reçine bakımından zengin alanlarda önemli mikro çatlamalara ve yüksek hacimli fraksiyonlara sahip olan kompozitlerde yüksek gerilmelere neden olabilmektedir [26].

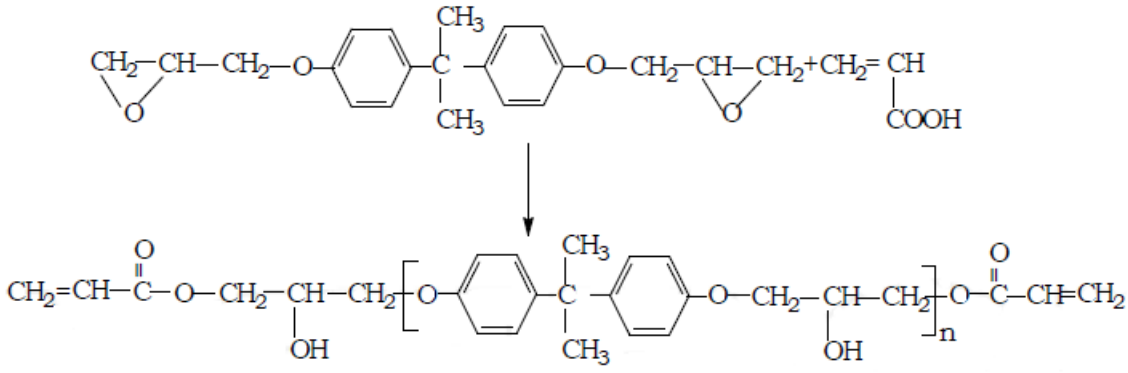
Epoksiler polyesterlerden ve vinilesterlerden daha pahalıdır, fakat genel olarak daha iyi mekanik özelliklere ve olağanüstü dayanıklılığa sahiptir. Epoksi de dahil olmak üzere termoset polimerlerin kimyasal reaksiyonlarla sertleştirildikten sonra tekrar eritilerek geri dönüşümleri mümkün değildir [55].

Matrisin önemli fonksiyonlarından biri de gerilmeleri aktarmasıdır. Elyaf ve matris arasındaki ara yüzey bağı kritik öneme sahiptir. Matris, çevresel etkilere maruz kalma veya mekanik yükler nedeniyle bozulduğunda, çoğu zaman fiber/matris ara yüzü zayıflar. Çoğu çalışmalarda GFRP'nin sıcak suda bozulmasına, suyun matris reçinesi tarafından emilmesi ve fiber/matris ara yüzeyinin çözünmesinin neden olduğu anlaşılmıştır [56].

Bir bileşenin FRP'de zaman içinde bozulması, kompozitin çeşitli özelliklerini etkiler. Matris, elyaf veya ara yüzeyde oluşabilecek olan hata şekillerinin sırasını da değiştirebilir hatta kusur modlarının sırasını bile değiştirebilir. FRP bir yapıda baskın olan hata modundaki bir değişiklik nedeniyle aniden kusur olabileceğinden bu konu önemlidir [57].

2.3.1. Vinilester Reçineler

Vinilester reçineleri, kaplama, baskılı devre kartları, metal folyo laminatlar, inşaat malzemeleri, otomotiv parçaları, sert köpükler ve elyaf takviyeli kompozitler gibi yeni endüstriyel uygulamalarda giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Geleneksel bir vinilester reçine, çeşitli epoksi reçinelerin doymamış mono-karboksilik asitle kapatılmasıyla hazırlanabilir [58]. Bunlar, epoksi reçinelerin mükemmel mekanik, kimyasal ve çözücü direnç özelliklerini doymamış polyester reçinelerde bulunan özelliklerle birleştirir. Kürlenmiş vinilester reçinesi, kürlenmiş geleneksel polyester reçineden daha üstün fiziksel özelliklere, özellikle de korozyon direncine sahiptir. Vinilester reçineleri, 1950'lerin sonlarında ve 1960'ların başlarında yani II. reçineler glisidil akrilet ve glisidil metakriletın bisfenol-A ile reaksiyona sokulmasıyla hazırlanmıştır. Bu reçineler çok reaktif ve çok kısa ömürlüdür. Vinilesterler, doymamış epoksi reçine esterleridir. Bu nedenle, epoksi reçinelerinin özelliklerine benzer mekanik ve hizmet özellikleri ve polyesterlerinkilere eşdeğer işleme teknikleri sunmaktadırlar. Epoksi reçinenin akrilik asit ile reaksiyona sokulmasıyla elde edilen vinilesterin genel bir yapısı Şekil 2.6'da gösterilmiştir [59].



Şekil 2.6. Epoksi reçine ve akrilik asitten elde edilen vinilesterin genel yapısı.

Gerçekten de, bunlar kür ve işlenme benzerliği nedeniyle genellikle doymamış polyester sınıfı olarak tanımlanır. Daha az çapraz bağ olması nedeniyle, kürlenmiş bir vinilester reçinesi daha esnektir ve kürlenmiş bir polyesterden daha yüksek kırılma tokluğuna sahiptir. Genel olarak vinilesterler iyi ıslanma özelliklerine sahiptir ve bir cam elyaf yüzeyinde benzer gruplarla hidrojen bağları oluşturabilen yüksek sayıda OH (hidroksil) grubundan dolayı cam elyaflarına iyi bağlanır [1],[1]. Güçlü asitlere ve güçlü alkalilere karşı direnç gösterirler ve hem oda hem de yüksek sıcaklıklarda işlenebilirler. Polyesterlerle karşileştırıldığında, vinilesterler azaltılmış su emme ve büzülme yanı sıra gelişmiş kimyasal direnç sunarlar [60].

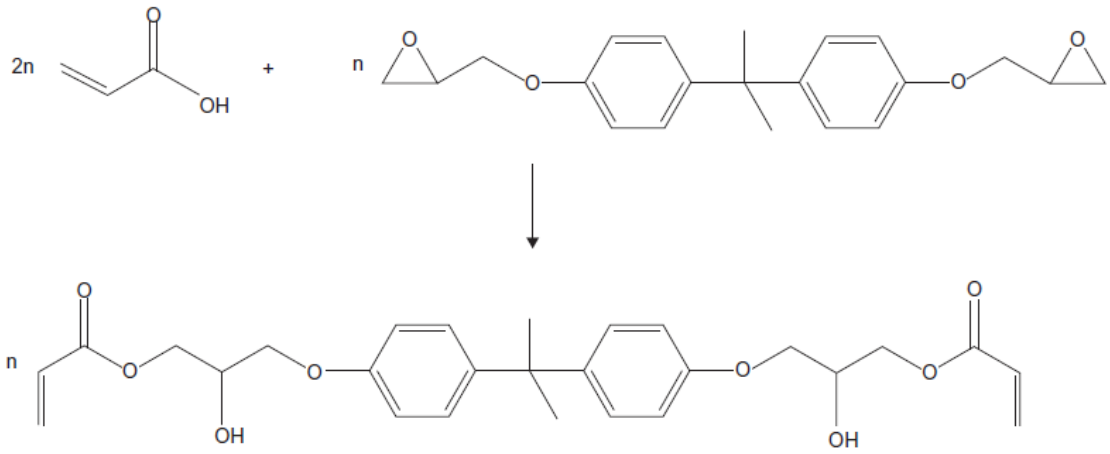
Vinilester reçineleri (VER'ler) yüksek performanslı elyaf takviyeli kompozitlerde büyük ölçüde matris sistemleri olarak uygulanır. Genellikle, metakriletlı epoksi sistemlerinin, peroksit başlatıcı ve bir katalizör varlığında stiren ile reaksiyona sokulması yoluyla elde edilirler. Stiren, doymamış polyesterlerde olduğu gibi, viskoziteyi azaltmak ve işlenebilirliği arttırmak için bir çözücü/seyreltici olarak ve vinilester monomerleri için bir zincir uzatıcı olarak görev alır. Monomerler, geniş çapraz bağlama yeteneği sağlayan uçta birkaç reaktif vinil grubu içerir [61].

Vinilester terimi farklı şekillerde kullanilebilir. Klasik terminolojiye göre, vinilesterler, R-COO-R0 ester grubunu bir vinilik fonksiyonel grupla (R0) içeren organik bileşiklerdir. Bu nedenle, vinilester reçineleri, bu tekli doymamış monomerlerin katılma ürünleri olarak düşünülebilir (örneğin polivinilesetat, polivinilbenzoat). Bununla birlikte, vinilester reçineleri, yalnızca doymamış monokarboksilik asitlere sahip olan diepoksi omurgalarının katılma polimerleridir. Bu doymamış polimerler, doymamış polyesterlerle benzer şekilde çapraz bağlanmış son vinilester polimerinin üretilmesi için çift bağdaki radikal polimerizasyon yoluyla diğer doymamış türlerle (örneğin stiren) reaksiyona girebilir [62].

Vinilester reçineleri, tipik olarak, levha kalıplama bileşiği (SMC) imalatında Grup II metal oksitler ve hidroksitlerle kalınlaştırmak için tasarlananlar gibi bazı özel tipleri haricinde terminal doymamışlığına sahiptir. Terminal C=C çift bağ, ya vinilester reçinenin kendisi ile homopolimerizasyonu veya stiren gibi doymamış monomerler ile kopolimerizasyonu ile reaksiyona girecektir. Teknolojik olarak vinilester reçineler, doymamış polyester reçineler ve epoksi reçineler arasında yer alır. Doymamış polyesterlerden daha az C=C çift bağ içerdiklerinden, çapraz bağlama yoğunluğu UPR'den daha düşüktür. Bu, VER esaslı malzemelerin darbe dayanımlarını

karşileştırmalı olarak arttırır ve kırılma ve çekme dayanımlarındaki uzamaları, benzer Young modülünde de daha iyidir. Vinilesterler ayrıca UPR'ye kıyasla geliştirilmiş kimyasal ve hidrolitik stabilite gösterirler. Bunun nedeni, moleküler zincirin sonunda bulunan doymamış C=C çift bağlarının çapraz bağlanma sırasında kolayca erişilebilir olmaları ve dolayısıyla kürleme üzerine dönüşümün pratik olarak tamamlanmış olmasıdır. Buna karşılık, UPR ile her zaman hidrolitik bozulmaya yatkın olabilecek moleküler omurga boyunca çok sayıda C=C çift bağı kalır [63].

En yaygın vinilesterler, düşük molekül ağırlıklı bir diepoksi reçinesini metakrilik asit veya akrilik asit gibi bir monokarboksilik doymamış asit ile esterleyerek yapılır. Bu tür epoksi metakriletlar veya epoksi akriletlar, yüksek sıcaklıkta peroksitlerin katalize ettiği serbest radikal reaksiyonları ile fakat aynı zamanda da foto-polimerizasyon yoluyla iyileştirilebilirler. Vinilester reçinesi homo veya kopolimerize edilebilir: Epoksi akriletlar, gerçekte, stiren gibi doymamış polyester reçineleri gibi çok daha fazla kullanilebilecek sıvı reçineleri vermek üzere, stiren gibi doymamış monomerlerde çözülebilir [64]. Basit bir diglisidil eter bisfenol A epoksi reçinesi ve akrilik asit kullanan bir bazik vinilester preparatı, Şekil 2.7'de görülmektedir [62].



Şekil 2.7. Bisfenol A ve akrilik asidin diglisidil eterine dayanan vinilester reçinesi.

Genellikle, amonyum tuzları, üçüncül aminler ve fosfinler orta derecede yüksek sıcaklıklarda kolayca ilerleyen asit-epoksi reaksiyonları için etkili katalizörlerdir.

Vinilester reçinelerinin çift bağları, daha uzun polimer zincirleri üretecek şekilde birbirlerine karşı radikal biçimde reaksiyona girer. Bu polimerizasyon tamamen vinilester fragmanları içerebilir, ancak çoğu zaman stiren gibi doymamış monomerlerin varlığı polimerizasyon işlemini daha kolay ve daha eksiksiz hale getirir. Vinilester

reçinenin nihai formülasyonunda düşük molekül ağırlıklı moleküllerin varlığı, gerçekte, reolojik nedenlerle de sıklıkla gereklidir. Saf epoksi vinil omurgalarının viskozitesi, makromolekülün kütlede sınırlı hareketliliğinden dolayı reçinenin hızlı bir şekilde kürlenmesini garanti etmek için genellikle çok yüksektir.

Vinilester reçineleri, genellikle doymamış polyesterlerden daha üstün olan tokluk ve kimyasal direnç özellikleri sunar. Vinilester reçineleri yapımında kullanılan epoksi reçine omurgası, bu reçinelere tokluk ve daha büyük çekme uzama özellikleri kazandırır. Vinilester reçinelerin üstün kimyasal direnci (doymamış polyesterlere kıyasla), kısmen, polimer birimlerinin fenil eter bağlarıyla bağlandığı bölgelerde epoksi omurgasında ester bağlarının bulunmamasından kaynaklanmaktadır. Bu son kısımlar, birçok kimyasal ortamda ve özellikle yüksek pH alkali durumlarda, ester bağlantilerından bozulmaya karşı çok daha dirençlidir. Bir vinilester reçinesindeki ester bağları, molekülün sadece ucunda bulunur, bu kimyasal olarak saldırabilen ester bağlarının sayısını en aza indirir. Ayrıca, vinilester reçine molekülü metakrilet grupları ile sonlandırılırsa, metakrilet grubu üzerindeki uzamsal olarak büyük metil grubu, ester bağlantısını kimyasal saldırıya karşı sterik olarak korur. Molekülün uçlarında bulunan vinil doymamışlığı ile vinilester reçineleri çok reaktif hale getirilebilir. Homopolimerler veya stiren gibi monomerlere sahip kopolimerler olarak hızlı kuvvet gelişimi ile hızla kürlenme yeteneğine sahiptirler [65].

Vinilester reçinelerinin tüm formülasyonları aynı iyi özelliklere sahip değildir. Formülasyonun ayarını anlamak için tartışilecak en önemli iki parametre şunlardır: (i) polimerin iskeletini oluşturan monomerler ve (ii) reçinenin moleküler ağırlığı. Monomer ile ilgili olarak, vinilester zincirini oluşturan uygun bir monomerin seçimi, nihai kullanım aşamasında polimerin özelliklerini belirlediği için temeldir. Örneğin, metakrilik asit, kompozit uygulamaları için amaçlanan vinilester reçineleri için en yaygın şekilde kullanılırken, akrilik asit, kaplamalarda kullanılması amaçlanan reçineler için tercih edilir. Tersine, malepimarik asit kullanımı, reçinenin son formülasyonunda çok iyi termo-mekanik özellikler ve daha yüksek kimyasal direnç sağlayacak olan %70'e kadar stiren monomerinin kullanılmasına izin verir. Aromatikler yerine zincirlemede aelyafatiklerin bulunması, vinilester reçinenin UV direncini arttırırken, Toluene diisocyanate monomerlerinin kullanımı, sertleştirilmiş polimerlere yüksek darbe dayanımı ve yüksek çekme dayanımı karakteristiklerini getirmektedir [66]. Moleküler ağırlık ile ilgili olarak, vinilester reçinenin moleküler kütlesi, epoksi

omurgasının seçimi ile değişebilir. Kompozitler için kullanılan en yaygın vinilester reçineleri için, bisfenol A'nın diglisidil eterinin iki molü epoksi omurgasını oluşturmak için ve bir mol bisfenol A ile zinciri uzatmak için kullanılır. Bu şekilde, gerilme direnci ve uzama, ısı sapma noktası ve reaktivite gibi moleküler ağırlık ve omurga yapısına bağlı özellikler, farklı nihai uygulamalara göre ayarlanabilir [67].

Çizelge 2.6 stirenli sıvı vinilester reçinesinin tipik özelliklerini göstermektedir. Çizelge 2.7 ise sertleştirilmiş döküm stirenli vinilester reçinesinin tipik özelliklerini göstermektedir.

Çizelge 2.6. Stirenli sıvı vinilester reçinenin özellikleri.

Özellik	**Değer**
Stiren içeriği	Ağırlıkça %45-50
Uçucu olmayan madde	%50-55
25 °C'de Viskozite	0,08-0,6 Pas
Yoğunluk	0,86 g/cm^3
Renk, Partner renk skalası	2-3
SPI jel zamanı	10-19 dakika
25 °C'de jel zamanı*	20-25 dakika
Parlama noktası	35 °C

* %0,5 ağırlıkça %12 lik kobalt oktoat (Co) ile hızlandırıldı ve %1 MEK peroksit başlatıcı kullanıldı.

Çizelge 2.7. Kürlenmiş dökme vinilester reçinesinin fiziksel özellikleri.

Özellik	**Değer**
25 °C'de Çekme dayanımı	69 76 MPa
25 °C'de Çekme modülü	2480-3000 MPa
Çekme uzaması	%5,3-5,8
25 °C'de Eğilme dayanımı	124-131 MPa
25 °C'de Eğilme modülü	3100 MPa
HDT	88 °C -99 °C
Çentikli Izod darbe dayanımı	0,5-0,55 kg.m/çentik uzunluğu
Barcol sertliği	40-50

Stirenli sıvı reçineler tipik olarak işleme tekniğine ve son kullanıma bağlı olarak çeşitli katkı maddeleri ile birleştirilir. İnhibitörlerin ve sertleştirme katalizörlerinin yanı sıra,

tiksotropik maddeler, dolgu maddeleri, pigmentler, kalınlaştırıcı maddeler, ıslatıcı maddeler, köpük önleyici maddeler, ayırıcı maddeler gibi takviyeler kullanılır.

Polyesterlerle kullanılan bileşik ve malzemelerin çoğu, vinilester reçinelerinin bileşimlerinde de kullanilebilir. Polyesterlerden daha maliyetli olan vinilesterler genellikle polyesterler kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaz. Vinilesterler uygulamalarının çoğunu üstün kimyasal direncine ve onlarla yapilen kompozitlerin daha iyi fiziksel özelliklerine borçludur. Çizelge 2.8 polyester ve vinilesterlerin ortak katkı maddelerini ve bunların fonksiyonlarını özetlemektedir [62].

Çizelge 2.8. UPR ve VER formülasyonundaki bileşik katkı maddelerinin işlevleri.

Katkı	**Fonksiyonu**
Sertleştirme sistemleri	Sertleşmenin oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıklarda olmasını sağlar
İnhibitörler	Sertleşme reaksiyonunu geciktirir
Tiksotropik ajanlar	Akış kontrolü sağlar ve düşey laminasyon ve kaplamalarda sarkmayı önler
Dolgu Maddeleri	Maliyeti düşürür, daha düşük büzülme sağlar ve alev geciktirici gibi özel özellikler kazandırır
Pigmentler	Renk
Kalınlaştırıcı ajanlar	Sac veya dökme kalıplama olarak işlemek için gereken tutarlılığı verir (SMC, BMC)
Islatıcılar	Dolgu maddelerinin ve takviyelerin ıslanmasını kolaylaştırır
Kabarcık salma maddeleri	Laminasyon veya dökümde hava kabarcıklarının giderilmesini sağlar
Kalıp ayırıcı maddeler	Deforme edici adım olan kalıptan ayrılma işlemini kolaylaştırır
Katalizör indiktörleri	Renk değişimiyle katalizör eklenmesini gösterir

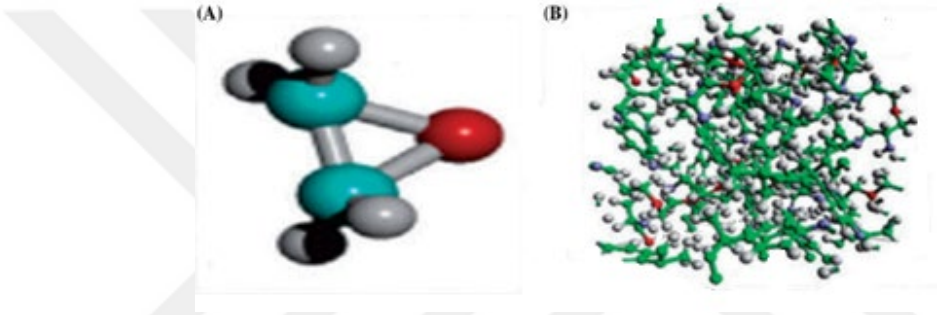
2.3.2. Epoksi Reçineleri

Epoksi reçineler mükemmel mekanik davranış, iyi kimyasal direnç ve optimum dielektrik özellikleri sergiler. Performansları, yüksek sıcaklıklarda iyidir. Ayrıca,

kürlenmesi kolaydır ve düşük büzülmeye sahiptirler. Takviye elyaflarına yapışmaları iyidir ve mükemmel boyutsal stabilite ve dayanıklılık sergilerler [68].

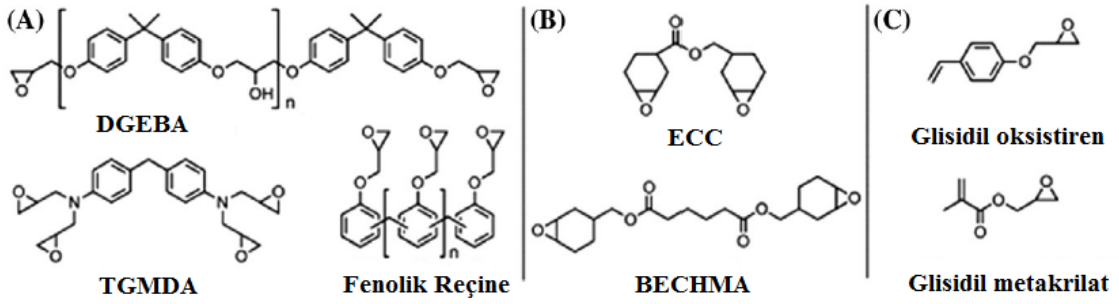
Epoksi reçineler polyesterlerden ve vinilesterlerden daha iyi mekanik özelliklere sahiptir ve havacılık kompozitlerinde matris olarak kullanılan başlıca termoset polimerdir.

Epoksi reçineleri, ilk olarak 1891 gibi erken bir tarihte sentezlenmiş olup, polimer zincirinde [69], Şekil 2.8'de gösterilmiş olan epoksi fonksiyonel grupları olarak en az iki oksiran grubuna sahip olan geniş bir moleküler yapı sınıfını ifade etmektedir. Epoksi grupları, karbon atomlarının elektrofilik ve yüksek derecede reaktif oldukları bir oksijen ve iki karbon atomundan oluşan üç üyeli bir halka şeklimde düzlemseldir.



Şekil 2.8. Epoksi yapısı (a) Epoksi oksiran halka (b) Sertleşmiş epoksi.

En popüler epoksi monomerleri, baz varlığında (sodyum hidroksit) bis (4-hidroksi fenilen) -2,2 propan (bisfenol A) ve 1-kloropren, 2-oksit (epiklorohidrin olarak adlandırılır) reaksiyonundan türetilir. Bazı tipik epoksi monomerleri, Şekil 2.9'da gösterilmiştir [70].



Şekil 2.9. Tipik epoksi monomerleri.

Epiklorohidrinin bir aromatik amin ile reaksiyonu, hava-uzay bileşiklerinde yaygın olarak kullanılan tetraglisilmetilendilinilin (TGMDA) gibi diğer tipik epoksi reçineleri

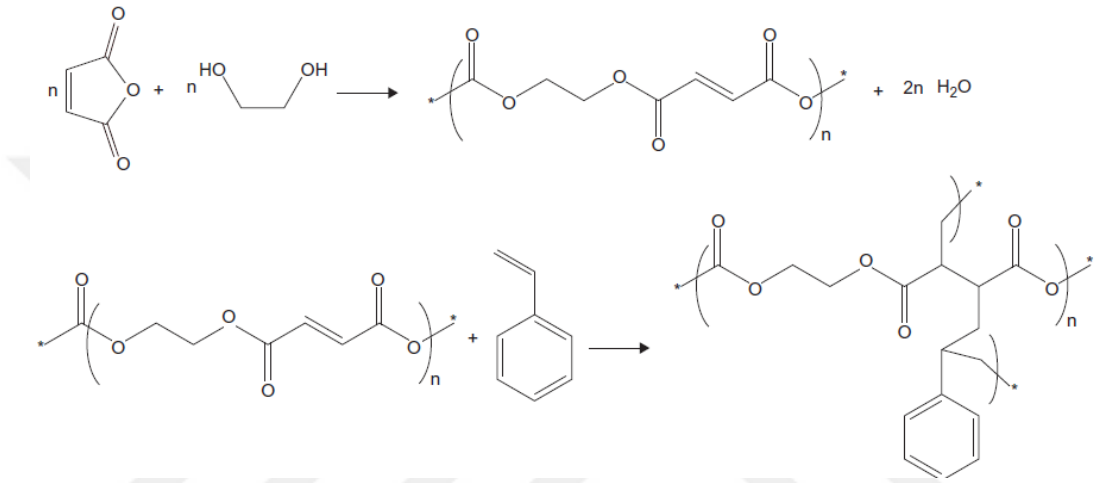
ile sonuçlanır. Fenolik prepolimerlerin poliglisidil türevleri (fenolik reçine) ayrıca yüksek camsı geçiş sıcaklığına (Tg) ve termal kararlılığa sahip ortak epoksi reçineleridir. Ek olarak, sikloalifatik reçineler aromatik reçinelere kıyasla daha iyi bir hava direncine ve daha az sararma eğilimine sahip olduklarından tercih edilmektedirler [70]. Fonksiyonel oligomerlerin sentezi için glisidil (met) akrilet ya da glisidil oksistiren gibi vinil grupları içeren epoksi monomerleri kullanilebilir. Sıkı olan üç boyutlu moleküler ağ yapilerına sahip kürleşmiş epoksiler nispeten yüksek termal stabiliteye ve Tg'ye sahiptir. Sertleşmiş epoksi, doğal kırılma davranışı ve mekanik uygulamalarını kısıtlayan zayıf çatlak büyüme direnci sergiler. Epoksi reçinelerinin kırılganlığı, sertleştirilmemiş reçineye bütadien akrilonitril gibi bir sıvı kauçuk eklenmesi de dahil olmak üzere, kauçuk sertleştirme işlemi ile azaltilebilir. Sertleştirilmiş epoksi polimer kompozitleri yük taşıma uygulamaları için yoğun olarak uygulanır [71]. Epoksi kürleşme süresi daha yüksektir ve fenolik bakımından oldukça yanıcı ve pahalıdır. Yüksek sıcaklıklara (300 °C-400 °C) maruz kaldığında epoksiler, kürleşmiş epoksi laminatın organik matrisinden salınan duman, ısı, toksik uçucu maddeler ve kurumları ayrıştırır. Bununla birlikte, alev geciktirici maddeler (FR'ler) katkı maddeleri ileve edilerek veya reaktif FR'lerle kopolimerizasyonla alev geciktiriciliği geliştirilebilir. FR epoksileri, yaygın olarak yüksek ölçekli uygulamalar için basılı kablo panolarında, elektrik ve elektronik, inşaat malzemeleri, otomobil, havacılık, denizcilik, boya, kaplama, yapıştırıcı ve ileri mühendislik kompozit imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır [72].

2.3.3. Doymamış Polyester Reçineler

Bu reçineler büyük ölçüde çok sayıda seri üretim ürününde kullanılmaktadır. Oda sıcaklığında sertleştirilebilirler ve açık kalıp püskürtme, sıkıştırma kalıplama, RTM ve döküm gibi çok çeşitli üretim tekniklerinde kullanilebilirler. Ayrıca fenolik ve epoksi reçinelere kıyasla daha düşük mekanik özelliklere ve daha büyük sertleşme hacimsel büzülmelerine sahiptirler, fakat kullanımları basittir ve oldukça ekonomiktirler [68].

Doymamış polyesterler, hammadde olarak kullanılan asitlerin veya glikollerin, doymamış halde reaktif olefinik pozisyonları sağlayan C=C çift bağları taşıması için doymuş polyesterlerden (örneğin polietilen tereftalat, polyester filmleri, şişeleri ve PET) oluşurlar. Bu reaktif doymamışlık daha sonra, olefinik çift bağlar içeren stiren ve metil metakrilet gibi ko-monomerler ile birlikte termoset çapraz bağlı polimerler oluşturmak

için çapraz bağlamada ikinci bir aşamada kullanilebilirler. Kaplama reçineleri teknolojisindeki "alkid" terimi, genellikle kendileri ile çapraz bağlanma veya monomerler ile kopolimerizasyon yapabilen polyester reçineler için de kullanılır. Polimer üretiminin ve çapraz bağlanmanın şematik bir gösterimi Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Tipik olarak, stiren içindeki doymamış polyester çözeltileri reçine üreticisi tarafından hazırlanır. Reçine formülasyonunun genellikle stiren ko-monomerine çapraz bağlanması nihai üç boyutlu ağ yapısındaki ürünü verir. Nihai ürün fiili imalat işlemi sırasında (SMC, BMC, döküm gibi) gerçekleşir [62].



Şekil 2.10. UPR omurgasının sentezi ve stiren ile çapraz bağlanması.

Doymamış polyesterler, poliollerin ve polikarboksilik asitlerin, olefinik doymamış bağlar ile reaksiyona girmesi sonucu oluşan tepkime polimerleridir. Kullanılan polioller ve polikarboksilik asitler genellikle iki işlevli alkollerdir (glikoller) ve ftalik ve maleik asit gibi iki işlevli asitlerdir.

Esterifikasyon reaksiyonunun yan ürünü olarak su üretilir ve polyesterizasyon reaksiyonunun tamamlanmasına neden olmak üzere oluşturulur oluşmaz reaksiyon kütlesinden çıkarılır. Kullanılan malzemelerin tümü, polyesterleştirme reaksiyonunu mümkün kılmak için en azından difonksiyonel olmalıdır [73].

Etil alkol ve asetik asit gibi tek fonksiyonlu reaktifler bir ester oluşturmak için reaksiyona girebilir (esterleşebilir), ancak bir polimer (polyester) oluşturamazlar. Propilen glikol (dihidroksi işlevsellik) ve maleik asit (dikarboksilik işlevsellik) gibi iki işlevli tepken maddeler, örneğin propilen glikol maleat gibi bazik polimerin tekrarlayan birimlerini içerebilen uzun zincirli bir polyester verecek şekilde devam eden esterleştirme tepkimesi ile esterleşebilirler. UPR reçinenin üretiminde çok çeşitli

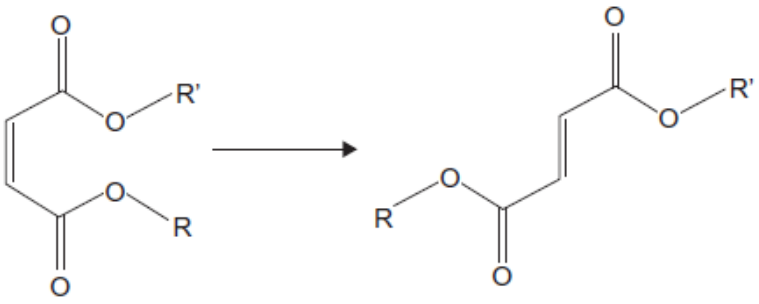
bileşikler kullanılması mümkündür. Doymamış polyesterlerin imalatında kullanılan tipik polioller, örneğin propilen, etilen, dipropilen, dietilen gibi glikollerdir. Doymamış genel amaçlı ve özel doymamış polyesterlerin pişirilmesinde kullanılan yaygın hammaddeler Çizelge 2.9'da özetlenmiştir [74].

Çizelge 2.9. Doymamış polyester üretiminde sık olarak kullanılan hammaddeler.

Hammadde	**Avantajı**
Propilen Glikol (PG)	Düşük maliyet, stiren uyumluluğu
Etilen Glikol (EG)	Düşük maliyet, sertlik
Dipropilen Glikol (UPRG)	Esneklik, tokluk
Dietilen Glikol (DEG)	Esneklik, tokluk
Neopentil Glikol (NPG)	UV, su ve kimyasal direnç
Trimetilpentanediol (TMPD)	Su ve kimyasal direnç
Sikloheksan Dimetanol (CHDM)	Elektriksel özellikler
Propoksiletlı Bisphenol A (PBPA)	Su ve kimyasal dayanım
Hidrojenlenmiş Bisfenol A (HBPA)	Su ve kimyasal direnç
Dibromoneopentil Glikol (DBNPG)	Alev geciktirici
Ftalik Anhidrit (PA)	Düşük maliyet, stiren uyumluluğu
Maleik Anhidrit (MA)	Düşük maliyet doymamışlık
Adipik Asit (AA)	Esneklik, tokluk
İzoftalik Asit (IPA)	Tokluk, su ve kimyasal direnç
Tereftalik Asit (TPA)	Daha yüksek ısı sapma noktası
Fumarik Asit (FA)	Maksimum reaktif doymamışlık
Glutarik Asit	Esneklik, tokluk
Dimer Asitler Esneklik	Tokluk
Azelaik Asit	Esneklik, tokluk
Klorendik Asit	Alev geciktirici, kimyasal direnç
Tetrabromoftalik Anhydride	Alev geciktirici, kimyasal direnç
Tetrakloroftalik Anhidrit	Alev geciktirici, kimyasal direnç
Endometilenetetrahidro-ftalik Anhidrit	Havayla kuruma özellikleri

Doymamış polyester sentezinin genel kimyası, genel amaçlı bir propilen glikol, maleik anhidrit ve ftalik anhidrit polyesterin sentezinin gösterimi aşağıda Şekil 2.11'de verilmiştir. Maleik anhidrit, UPR sentezi için en ucuz doymamış hammadde olmasına rağmen, fumarat izomeri, çapraz bağlama reaksiyonlarında çok daha reaktif olduğu için

(vinil monomerlerle kırk kata kadar etil maleat'ten daha reaktif) tercih edilmektedir [75].



Şekil 2.11. Cis-maleat'in transfumarata izomerizasyonu.

İzomerizasyon büyük ticari öneme sahiptir çünkü bu işlemde daha ucuz başlangıç malzemesi otomatik olarak daha pahalı, tercih edilen izomer haline gelir. Propilen glikol gibi sekonder glikoller, maleat ile fumarat arasında yüksek izomerizasyon sağlarken (%96 – 180 °C); izomerizasyon, etilen glikol, dietilen glikol veya 1,6-heksametilen glikol gibi primer glikollerle daha az (sırasıyla %64, %53 ve %36 izomerleştirme dereceleri) olacaktır [61]. İzomerizasyon ayrıca reaksiyon sıcaklığına ve süresine, daha yüksek sıcaklıklara ve genellikle daha uzun sürelere de bağlıdır. Tüm glikol ve sıcaklıklarda, izomerizasyon sabit bir değere yaklaşır.

Polyesterleşmenin tamamlanmasından sonra, doymamış polyester alkid erimiş bir kütle halinde su soğutmalı bir paslanmaz çelik tanklara boşaltılır ve genellikle bir inceltme tankında sıvı-monomer ile karıştırılır. Doymamış polyester alkid ve monomer karışımı çok reaktif olduğundan, inceltme işlemi sırasında kopolimerizasyonun oluşmasını önlemek için inceltmeden önce monomerde veya önceden yoğunlaştırılmış UPR'de polimerizasyon inhibitörleri bulunmalıdır. Hidrokinon veya toluhidrokinon veya monotertiar bütil hidrokinon gibi ikame edilmiş hidrokinonlar yaygın olarak inhibitör olarak kullanılır.

Çizelge 2.10 tipik bir genel amaçlı polyester reçinesi için reaktör dozunu göstermektedir [62].

Çizelge 2.10. Tipik bir polyester reçinesi üretimi için reaktördeki miktarlar.

Malzeme	**Mol**	**Reçine Miktarı başına miktar**	
		Miktar (kg)	%60 UOM*
Ftalik Anhidrit	1,5	100,0	0,2774
Propilen Glikol	2,7	93,0	0,2564
Maleik Anhidrit	1,0	44,5	0,1225
Hidroquinon	-	-	0,0001
Stiren Monomer	-	-	0,4000
%60 UOM (%40 stiren içeren) reçine yapılması için toplam malzemeler	-	-	1,0564

***** uçucu olmayan madde

Reaksiyon suyu : yaklaşık 20 kg.

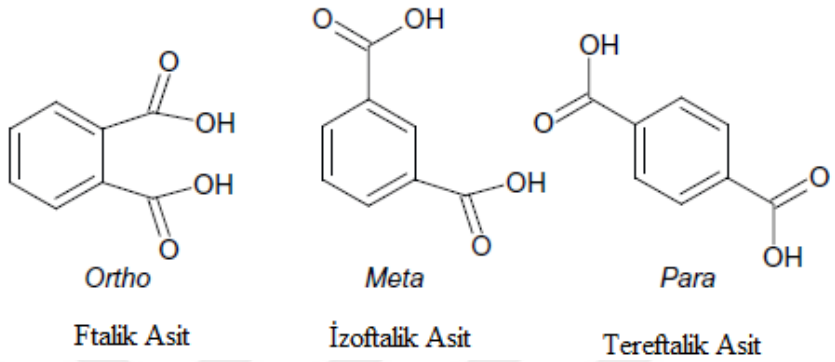
Alkid pişme verimi: yaklaşık olarak 217,8 kg : yaklaşık olarak %91,43.

Genel olarak inceltilmiş reçine verimi: yaklaşık olarak %94,66.

Genel amaçlı UPR reçineler tipik olarak propilen glikol (1,2-propandiol), maleik anhidrit ve ftalik anhidrit esaslıdır. Ftalik anhidritin maleik anhidrite molar oranı genellikle 1:1 ile 2:1 arasında değişmektedir. Bu tip sert GP reçineleri çoğu döküm, kalıplama ve laminasyon türlerinde kullanilebilir. Bunlar, imalatlarında kullanılan ftaliklerin orto izomeri olarak adlandırilen genel amaçlı orto reçineleridir. (Ftalik asit, üç izomerik formda bulunabilir: orto izomer, her zaman ftalik asit veya anhidrit, izoftalik olarak meta izomer ve tereftalik olarak para izomer olarak adlandırılır) ve kimyasal yapileri Şekil 2.12'de gösterilmektedir.

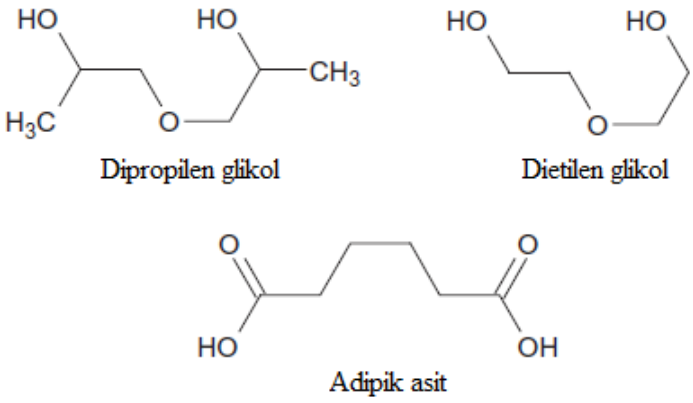
En yaygın şekilde kullanılan reçine termal özelliklerinden biri polyesterin termal olarak aktive olan moleküler hareketlere dayanma kabiliyetinin belirlendiği ısı altında bozunma (sapma) sıcaklığıdır (HDT). HDT, kısa vadeli bir özelliktir ve uzun vadeli termal kararlılığın bir ölçütü değildir. Polyester reçine HDT değerleri el yatırmasında kullanılan ortoftalik reçineler için 50 ºC-75 ºC iken; yüksek ısı vinilesterleri için 138 ºC kadar yüksek değerlere sahip olduğu rapor edilmiştir. HDT, reçinenin termal hassasiyetinin bir ölçüsüdür. HDT'nin üstündeki bükülme mukavemeti hızla azalmaktadır [76].

Ftalik anhidritin maleik anhidrite molar oranı, sertlik, gerilme uzaması, HDT veya yumuşama sıcaklığı, kırılma indisi ve reaktivite gibi dökme reçine özelliklerini etkileyecektir. Daha fazla maleik anhidrit kullanarak doygunluğun arttırılması, reaktiviteyi, HDT ve kürleşmiş malzemenin sertliğini artıracaktır. Öte yandan, artan ftalik anhidrit, daha yüksek kırılma indisi ve azalmış reaktiviteli reçineler verecektir [77].



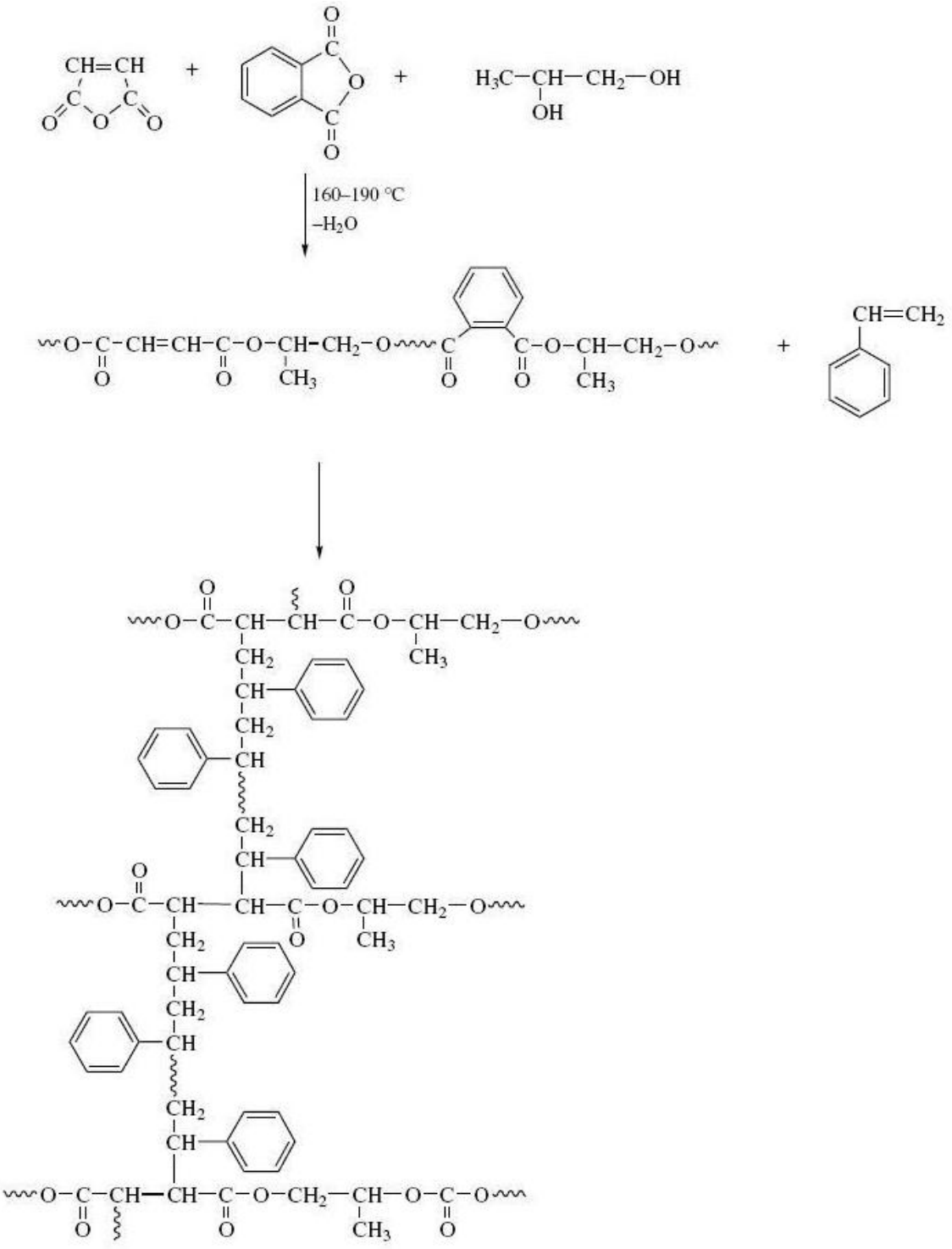
Şekil 2.12. Ftalik asit, izoftalik asit ve tereftalik asit yapileri.

Daha fazla gerilme uzaması, esneklik ve tokluk özellikleri; propilenin bir kısmı veya tamamı için dipropilen veya dietilen glikol gibi eter glikollerin ikame edilmesiyle doymamış polyester reçinelere kazandırilebilmektedir. Glikol ve genel amaçlı polyester reçine formülünde kullanılan ftaliklerin tümü veya bir kısmı için Şekil 2.13'te görüleceği üzere adipik asit gibi uzun zincirli aelyafatik asitler kullanilerak esnekleştirme sağlanmaktadır. Bu esnek hale getirilmiş reçineler, sertleştiklerinde daha yumuşak olacak ve HDT azalacaktır. Reçinenin alkid "omurgasına" verildiğinden kürlenmiş, çapraz bağlı reçine içindeki esnekleştirme, dibutil ftalat gibi kaçak bir dış plastikleştiricinin eklenmesiyle yaratılabileceğinin aksine kalıcıdır. Esnekleştirmenin bir sakıncası, hidrolitik kararlılığın azaltılmasıdır [62].



Şekil 2.13. Dipropilen glikol, dietilen glikol ve adipik asit yapileri.

Laboratuvar ölçeğinde numune bir doymamış polyester reçine hazırlanması reaksiyonu Şekil 2.14'te gösterilmiştir. 1,25 mol Propilen glikol (PG), 0,5 mol Ftalik anhidrit (PA), %0,2 p-Toluen sülfonik asit (PTSA) ve çözücü olarak ksilen karışımı, karıştırıcı, termometre, azot gaz giriş tüpü, ayırıcı ve su kondansatörü ile donatılmış üç boyunlu bir reaksiyon kazanında doldurularak karışım mekanik olarak karıştırılmıştır ve azot gazı akımı altında 1200 °C'de ısıtılmıştır. Reaksiyon kütlesi berraklaştığında, 800 °C 'ye soğumasına izin verilerek 0,5 mol Maleik anhidrit (MA) ileve edilmiştir. Asit sayısı 20 olana kadar 150 °C-200 °C'de ısıtmaya devam edilmiştir. Esterifikasyon reaksiyonu sırasında, üründe olduğu gibi oluşan su, reaksiyon hızını önlediği için reaksiyon kütlesinden sürekli olarak uzaklaştırılmıştır. Ksilen tamamen damıtılarak ve reaksiyon ürünü soğumaya bırakılmıştır. Sıcaklık 160 °C'ye ulaştığında, önleyici olarak 20 mg hidrokinon ileve edilerek reçine sıcaklığı reaktif seyrelticinin (yani Stiren) kaynama noktasının altına düştüğünde, polyester reçinesi ağırlıkça yüzde 35 reçineyle stiren ile karıştırılmıştır [78].



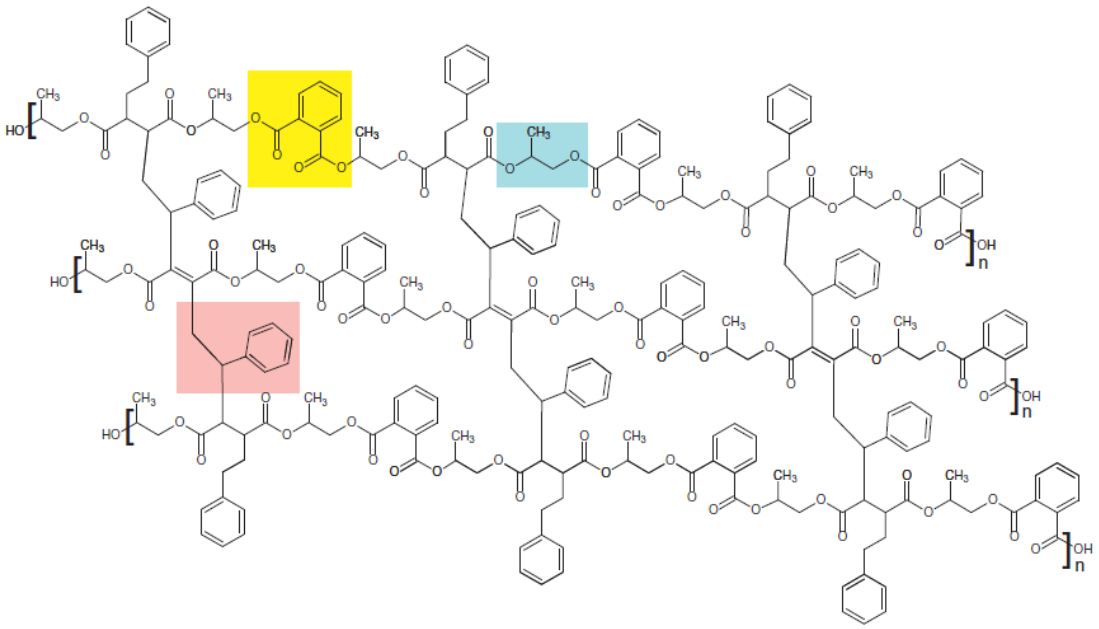
Şekil 2.14. Laboratuvar ölçeğinde doymamış polyester reçine hazırlanması.

2.3.3.1. Doymamış Polyester Reçinenin Kopolimerizasyon Monomeri

Ticari olarak doymamış polyester terimi genellikle bir doymamış polyester alkidinin stiren monomer ile kombinasyonuna karşılık gelir. Genellikle 800 ile 3000 arasında değişen ortalama moleküler ağırlıkları ile doymamış polyester alkidleri yoğunlaştırılmış

polimerler değildir, fakat daha ziyade reaktif düşük molekül ağırlıklı prepolimerler olarak düşünülebilir. Bir sonraki sertleşme reaksiyonunda stiren gibi doymamış bir monomer ile kopolimerizasyon, sertleştirilmiş bir doymamış polyester reçinesi olan üç boyutlu çapraz bağlı polimeri oluştururlar. Sıvı olan bu reçine, diğer bileşenlerle karıştırmak veya döküm ve kalıplama işlemleri için karıştırmak ve kullanım kolaylığı gibi sıvıların tüm avantajlarını sunmaktadır [58].

Stiren, polyester reçinelerinde kullanım için çoğu açıdan ideal bir monomerdir, çünkü maliyeti düşüktür, makul monomer seviyelerinde düşük viskoziteli reçineler verebilir ve oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta kürleme sistemlerinde doymamış polyester alkid ile kolayca kopolimerize olur. Doymamış polyester alkidlerin ve doymamış monomerlerin kopolimerizasyon kimyası, genellikle, ultraviyole ışık veya elektron ışınları gibi orta ile yüksek enerjili radyasyon kullanılmasıyla peroksitlerin, azo bileşiklerinin veya serbest radikallerin üretilmesiyle oluşan serbest radikallerle başlatılır. Monomer olarak stiren ile kopolimerizasyon reaksiyonu, Şekil 2.15'te temel yapı taşları ftalik asit (sarı arka plan), propilen glikol (mavi arka plan) ve stiren (kırmızı arka plan) bazında stiren çapraz bağlı doymamış polyester reçine zincirlerinin kimyasal yapısının gösterildiği gibi doymamış polyester alkid zincirlerinde fumarat/maleat çift bağlarına stiren monomerinin eklenmesi ile oluşur [74].



Şekil 2.15. Stiren çapraz bağlı UP reçine zincirlerinin kimyasal yapısı.

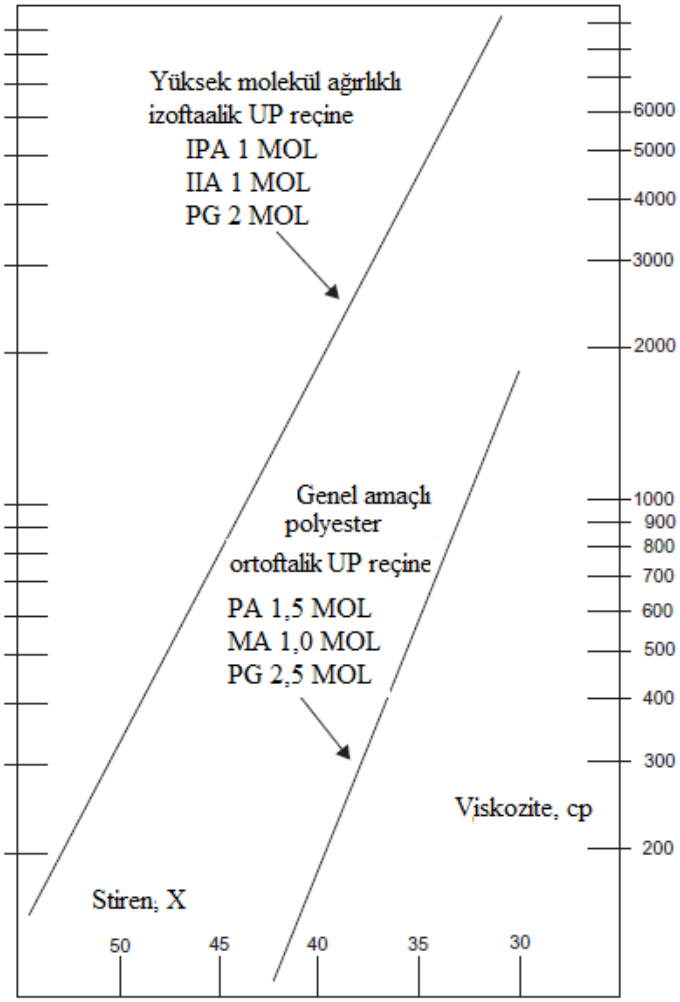
Stiren UPR sıvileri, ince (50 cp) sıvılardan 4 ile 6 Pas ve daha yüksek viskoziteli viskoz akışkanlara kadar değişen çok çeşitli viskozitelere kadar yapilebilir. Renk, çok soluk sarıdan koyu sarıya kadar değişebilir ve ayrıca kürleme promotörleri ve tabii ki renklendiriciler gibi renge katkıda bulunan katkilerın varlığından da etkilenebilir. Ayrıca, ortam sıcaklığından kürlere kadar yüksek sıcaklıkta kürleme koşullarına kadar değişen kürleme yöntemleriyle uyumlu hale getirilebilirler [79]. Tipik bir genel amaçlı doymamış polyester alkidinin stirenleştirilmesiyle elde edilen tipik sıvı reçine özellikleri Çizelge 2.11'de gösterilmektedir.

Doymamış bir polyester reçinenin sertleşme davranışı, SPI (Plastik Endüstrisi Birliği) Jel Zaman Testi veya diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) termogramları tarafından üretilen ekzotermik sıcaklık eğrisi ile zamanla gösterilebilir. Çoğu ticari doymamış polyester reçineleri çapraz bağlama monomeri olarak stiren içerir. Doymamış polyesterler ayrıca allil bileşikleri kullanilerak çapraz bağlanabilir. Dialilftalat (DAP) gibi aliliklik monomerler, doymamış polyesterleri ve alkidleri çapraz bağlamak için kullanilebilir. Bunun dışında, doymamış polyesterleri çapraz bağlamak için stirenden farklı olarak kullanılan bazı önemli monomerlere; hava direnci sebebiyle metil metakrilet (MMA), daha az uçuculuk ve daha yüksek parlama noktası özelliği sebebiyle vinil toluen (VT), yangın geciktirici özelliği sebebiyle diallyl tetrabromophthalate, daha az uçuculuk, daha yüksek parlama noktası özelliği ile para-metil stiren (PMS) örnek verilebilir [80].

Çizelge 2.11. Stirenli sıvı UPR reçinenin özellikleri.

Özellik	**Değer**
Stiren içeriği	Ağırlıkça %32
25 °C'de Viskozite	1,1 Pas
Özgül ağırlık	1,14
Renk	soluk sarı
SPI jel zamanı	5-7 dakika
Pik ekzoterm süresi	6-8 dakika
Pik ekzoterm sıcaklığı	171 °C-182 °C
Parlama noktası (kapalı kap)	31 °C-35 °C

UP ve VE reçineleri bazlı üretim işlemleri genellikle bu reçinelerin sıvı yapısına dayanır. Gereken reçine viskoziteleri, kullanılan işlemin türüne bağlıdır ve örneğin stiren gibi bir monomerin içeriğini artırarak veya azaltarak veya UPR'nin moleküler ağırlığını değiştirerek kolayca değiştirilebilir. Şekil 2.16'da stiren içeriği bağlı olarak viskozite değişimi genel amaçlı bir ortoftalik reçine ve yüksek moleküler ağırlıklı bir izoftalik reçine için gösterilmiştir [80].



Şekil 2.16. Orto ve izo polyesterler için viskozite-stiren içeriği.

2.3.3.2. *Doymamış Polyester Reçinelerin Kür Sistemleri*

Stirenlenmiş doymamış polyester reçineler oda sıcaklığına (RT) veya ısıl işlem yöntemlerine göre sertleştirilebilirler. Vinil tolüen, metil metakrilet ve para-metilstiren gibi diğer monomerler de oda sıcaklığına veya ısıyla sertleştirme sistemlerine vermek üzere genellikle stiren ile birlikte kullanilebilir. Dialilftalat veya izoftalat monomerleri, RT kürlerinde iyi cevap vermezler ve genellikle sadece prepreg ve kalıplama bileşikleri gibi ısıyla sertleşme uygulamalarında kullanılırlar. Vinilesterler ayrıca oda sıcaklığı veya yüksek sıcaklıkta kürleme ile de sertleştirilebilir ve stiren kullanılan en yaygın monomerdir. Tipik sertleştirme katalizörleri olarak, metal ihtiva eden çözeltiler/keton peroksit bazlı veya aromatik üçüncül amin/benzoil peroksit bazlı katalizörler kullanılır. Çoğu zaman, işlem hızını arttırmak için ticari reçinelere önceden hızlandırıcı katılmaktadır [81].

Oda sıcaklığı sertleşme sistemlerinde genellikle primer promotörler olarak geçiş metali çözeltileri ve katalizörler olarak keton peroksitleri kullanılmaktadır. Kobalt nafttenat, oktoat veya neodekanoat gibi kobalt çözeltileri, iyi sertleşme davranışı ve oda sıcaklığı kürleşme sağlayan en popüler metalik promotörlerdir. Kullanılan diğer birincil metalik promotörler, manganez, vanadyum, kalay, kalsiyum ve baryum bileşikleridir. Vanadyum, keton peroksit katalizörleri ile oda sıcaklığında çok hızlı kürleşen sistemleri verebilir, ancak özel stabilizasyon yöntemleri kullanılmadığı sürece, hızlandırıcılı reçineye raf ömrü problemlerinin yanısıra, sertleşmiş reçineye belirgin bir sarı renk vermesi gibi dezavantajları vardır [82].

Kobalt hızlandırıcısına sahip reçinenin oda sıcaklığında sertleşmesinin tipik bir örneğini vermek gerekirse; 100 kısım reçineye (tipik %40 stiren içeriğine sahip) 0,25 kısım katalizör (%12 Co içeren) ileve edilir. 1 kısım MEK peroksit katalizörlü ile, 25 °C'de 50 g'lik bir numunenin jel süresi (katalizör ilevesinden itibaren geçen süre), 14-20 dakika; ilgili pik sıcaklık süresi (sertleşme reçinesi kütlesinde jelasyondan maksimum sıcaklığa kadar geçen süre), 25 ile 30 dakika, pik egzoterm sıcaklığı (reçine kütlesinde ulaşilen maksimum sıcaklık) 116 °C ile 132 °C ile olacaktır. Kobalt bileşikleri ana birincil hızlandırıcılar olmasına rağmen, ticari oda sıcaklığı kürleşme reçinelerinde kullanılan birçok farklı ikincil hızlandırıcı tipi vardır. Birçok ticari reçine sadece bu metalik birincil hızlandırıcıları değil aynı zamanda ikincil hızlandırıcıları içerdikleri için çift hızlandırıcılıdır. Bu katalizörlerin işlevleri; (i) jelasyondan sonra kürleşmeyi hızlandırmak ve (ii) genellikle tek kobalt destekli reçinelerle sıkça meydana gelen yaşlanmada jel-zaman kaymasını dengelemeye yardımcı olmaktır. Yaygın olarak kullanılan bazı ikincil hızlandırıcılar, tersiyer aminler (dietilelinin, dimetilenilin, dimetiletanolamin, feniletanotanoin veya dimetil-p-toluidin gibi), asetamitler (N, N-dimetilesetamit ve N-metilesetamid), asetoasetatlar (metilesetoasetat, etilesetoasetat) ve kuaterner tuzlardır (benziltrimetilemonyumklorür, C12-C24 kuaterner amonyum klorürler veya trifenilsülfonyum klorür gibi). Yukarıdaki örnekte, 100 parça reçineye ileve olarak 0,25 parça dietil anilin ilevesi; hem jel zamanını hem de pik sıcaklığına ulaşma süresini 8 ile 12 dakika arasında azaltırken, pik ekzotermik sıcaklığını 143 °C ile 160 °C'ye kadar yükseltecektir [83].

Reçine özelliklerinin, takviye kuvvetinin baskın kuvveti ve sertliği nedeniyle, takviyeli polyesterlerin mekanik performansı üzerinde çok az bir etkisi olduğu söylenmektedir. Sertleşme şartlarına dair standartların belirsizliği ile birleştiğinde bu bakış açısı, reçine

özelliklerinin laminat özellikleri üzerindeki etkisi üzerine sürekli tartışmalara yol açmıştır. Öte yandan iyi işlenmiş malzeme üretmenin yolunun yüksek peroksit içeriği, yüksek çalışma sıcaklığı ve postkür ihtiyacı olduğunu savunanlar vardır. Kürleme ve postkürleme ile ilgili bakım ve kontrolün imalatçiler tarafından yapılması gerektiği vurgulanmaktadır [84].

Doymamış polyesterler genel olarak oda sıcaklığında, hızlandırıcılar (katalizörler) tarafından aktive edilen peroksitler (başlatıcılar) veya serbest bir katalizör ve ılımlı ısıtma kullanilerak serbest radikal kopolimerizasyon reaksiyonu ile kürlenir. Her ne kadar "katalist" terimi GEP endüstrisinde günlük kullanıma girmiş olsa da, polyesterler için katalistler tipik olarak organik peroksitlerdir ve değişmeden kalırken kimyasal reaksiyonu hızlandırmazlar. Reaksiyonu başlatmak için mutlaka ayrışırlar ve tehlikeli yapileri nedeniyle, bir plastikleştirici içinde bir macun veya sıvı dispersiyonu olarak veya inert bir dolgu maddesi içinde bir toz olarak tedarik edilmeleri gerekir. Hızlandırıcılar, kobalt oktoat (Co) ve üçüncül aminler gibi aktif bileşiklerdir. Sadece küçük miktar ileveler gerektiğinden, normal olarak çeşitli maddelere seyreltilirler. Reçinede kolay dağılım için bir çözücü içinde konsantrasyonları kullanılır. Bazen çift promotorlar tercih edilir ve son yıllarda reçineler önceden hızlandırılmış formda tedarik edilmektedir.

Sertleşme çok aşamalı bir reaksiyondur. Reçineler ve sertleştirme ajanları seçilerek ve bunların nispi miktarlarını kontrol ederek, sistem belirli işlem gereksinimlerini karşileyacak şekilde uyarlanabilir. Tüm polyester reçineler, jelleşme süresini ayarlamak ve yeterli raf ömrü sağlamak için bir inhibitör/stabilizatör içerir. Bir hızlandırıcının varlığında veya ısı altında, polimerizasyon reaksiyonu hızlandırılır, ancak reçine hala uygulanabilir. Bu "indüksiyon" adı verilen süre boyunca, takviye reçine ile ıslatılır ve jelleşmeye başlayana kadar konsolide edilir. Bu noktada, çapraz bağlanma, ekzoterm nedeniyle ısı gelişimi ile birlikte gerçekleşir. Son olarak, reçine sertleşir-ilk başta hızlıca, ancak bazı durumlarda sertleşme birkaç gün hatta haftalarca devam edebilir. Yüksek sıcaklıklarda kürlenme, tam olgunluğa ulaşma süresini kısaltır [84].

Özetle aynı reçine sisteminin imalat boyunca, özellikle de postkürün bir gereklilik olduğu durumlarda kullanılması düşünülmelidir. Jelkot performansı, hem jelkot hem de yedek reçine esnekliğinin bir fonksiyonudur. Genel olarak, esneklikler ne kadar fazlaysa ve ne kadar yakın tutulursa, erken jelkot arızası riski de o kadar az olur. Piyasada satılan polyester reçinelerle postkür, modülü ve kimyasal direnci iyileştirir [84].

2.4. ELYAF TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLER

Kompozitler, matrislerinin işlevine göre Metal Matrisli Kompozitler (MMC), Seramik Matrisli Kompozitler (CMC) ve Plastik Matrisli Kompozitler (PMC) olmak üzere üç ayrı sınıfa ayrilebilirler. PMC'ler; MMC ve CMC'ye kıyasla nispeten düşük hammadde maliyeti, basit üretim yöntemleri ve mükemmel bir maliyet/performans oranı sergilerler. İki farklı tipte matris olarak kullanılan, termoset ve termoplastikler mevcuttur [85].

Elyaf takviyeli polimer kompozitler hala gelişen bir mühendislik malzeme sınıfıdır. Genellikle, takviye edici elyafların ve matris özelliklerinin (termoplastikler veya termosetler) görünümüne göre genel olarak gruplandırılmış çok çeşitli tipler içerirler. Kompozitler, tanınabilir bir faza sahip iki veya daha fazla farklı fazdan oluşan malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Buna göre, kompozitler en az üç fazdan oluşur. Elyaflar doğası gereği dökme malzemelere göre daha güçlüdür çünkü kusurların olasılığı boyut küçüldükçe azalır. Cam (GF), karbon (CF), aramid (AF), doğal elyaflar (NF) gibi en önemli güçlendirici elyafların sertliği ve kuvveti, polimerik matrislerinkinden belirgin şekilde daha yüksektir. Yüksek mukavemetli inorganik elyaf, cam, karbon ve seramik elyafı içerir. Bununla birlikte, elyaf takviyeli polimer kompozitlerde pratik önemi nedeniyle, dikkatler burada cam ve karbon elyaflara odaklanmaktadır. Matris, yükleri fiberlere aktarır ve gerilmeleri bunlar arasında dağıtır. Matris ayrıca, elyaflı takviyenin ortamdan korunmasından sorumludur ve elyafların gerekli şekilde konumlandırılmasını sağlar. Elyaf/matris ara yüzeyi, "zayıf" matristen "güçlü" lere ve matristen elyaflara stres transferini garanti eder.

Polimer-matris kompozitler, karbon-matris, seramik-matris ve metal-matris kompozitlere kıyasla imalat kolaylıkları nedeniyle avantajlıdırlar. Sürekli karbon elyaflı polimer-matris kompozitler yapısal uygulamalarda daha çok hakimdir. Genellikle laminatlar şeklindedirler. Ara yüzey, bir laminattaki zayıf halkadır, ancak bu parametrelerin, bu ara yüzün kontak elektriksel direnci üzerindeki etkileri nedeniyle, sıcaklık, hasar sensörüdürler [86].

Elyaf ve matris arasında farklı fiziko-kimyasal özelliklere sahip sonlu bir ara katman anlamına gelen ara yüzey terimi 1970'lerde ortaya çıkmıştır [87]. Bu faz, elyaf ve matris arasındaki etkileşimleri ve dolayısıyla yapısal kompozitlerin mekanik özellik profilini kontrol eder. Çekme mukavemeti ve modülü gibi mekanik özellikler temel olarak elyafın çekme özellikleri, hacimsel kesri, oryantasyonu (yüklemeye göre) ve uzunluk ile

kontrol edilir. Fazlar arası mühendislik için bazı genel tasarım kavramları vardır. Örneğin, yüksek sertlik ve mukavemet elde etmek için elyaf ve matris arasında kuvvetli bir bağ tavsiye edilirken, nispeten zayıf bir ara yüzey bağlaması genellikle darbe koşullarında enerji emici performansları iyileştirir. Bununla birlikte, polimer kompozitlerinde stres transferi ve enerji emici mekanizmaların tamamen farklı olduğu görülmektedir [88].

Ara yüzeyin yük aktarma kabiliyeti, doğada fiziko-kimyasal veya sürtünmeli (veya her ikisi de) olabilen elyaf/matris yapışmasına bağlıdır [89]. Kimyasal reaksiyonlar, moleküller arası etkileşimler, yüzey kaynaklı kriztallizasyonlar, faz ayrılma olayları vb. dahil olmak üzere fiziko-kimyasal katkı, polimer kompozitlerde sürtünmeden daha önemli görünmektedir. Bununla birlikte, bazı kavramlar, elyaf yüzeyini "pürüzlendirerek" kuvvetle tetikler ve elyaf ve matrisin diferansiyel termal büzülmesini uygun kürleme/soğutma döngüleri ile uyarırlar. Bu ara faz, kompozit performansın kilit faktörü olduğundan, mühendislik tasarımı hem akademi hem de endüstrinin ilgisini çekmektedir. Ara fazın özellikleri, yerel olarak baskın olan stres alanı, olası çevresel saldırı, servis sıcaklığı, vb. gibi çeşitli parametrelere dayanarak uyarlanmalıdır. Ayrıca, elyaf takviyeli polimerdeki baskın kusur modunun erken tespiti ve hatta iyileşmesi genellikle asıl hedeftir. Evre değişikliklerinde uyarlanabilir (çevresel değişime tek yönlü tepki) ve akıllı (çevresel değişime bağlı iki yönlü "iletişim") gelişmeleri de dikkate almak için farklı özellikler oluşturulmuştur [90]. Bununla birlikte, “ara yüzey mühendisliği” nin bu alandaki gelişmeleri kapsayacak şekilde daha uygun bir terim olduğu görülmektedir.

2.5. POLİMER MATRİSLERİN GENEL ÜRETİM YÖNTEMLERİ

UPR'ler ve VER'ler, ya da elyaf takviyeleri ile birlikte kullanılırlar, elyaf takviyeli ürünler çok daha büyük sanayi ile ilgilidir. Elyaf destekli UPR ve VE bazlı ürünlerin üretimi için en önemli prosesler; el yatırması, yarı otomatik ve otomatik püskürtme uygulaması, reçine transfer kalıplama (RTM), reaksiyon enjeksiyonlu kalıplama (RIM), döküm, merkezkaç savurma döküm, filement sarma ve pultruzyon yöntemlerinin yanı sıra, levha kalıplama (SMC) ve dökme kalıplama (BMC) bileşiklerinin hazırlanması olarak listelenebilir. Tipik olarak gerçekleştirilen üretim aşamaları aşağıdaki gibidir:

(1) reçine karışımının formülasyonu,

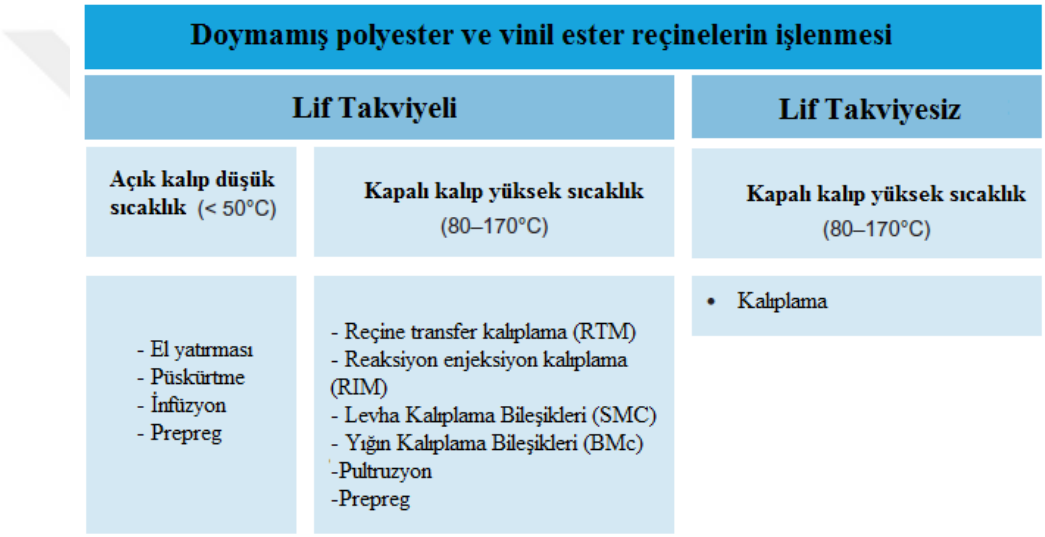
(2) güçlendirici elyafların iyice takviye edilmesi,

(3) iki boyutlu veya üç boyutlu parçaların (paneller, profiller, döküm parçalar) şekillendirilmesi,

(4) kürlenmiş kısmın işlenmesi (kaplama, renklendirme, mekanik işlem).

Elyaf takviyeli olmayan UPR'lerde elyaf takviyeli betonlar geliştirildiği halde; döküm, küçük ve büyük ölçekli polimer beton gibi çeşitli ürünler için kullanılan en önemli üretim sürecidir [91].

Şekil 2.17, tipik olarak kullanılan sıcaklıklara ve kalıplara göre çeşitli üretim işlemlerini göstermektedir. UP ve VE reçineleri bazlı üretim işlemleri genellikle bu reçinelerin sıvı yapısına dayanır [92].

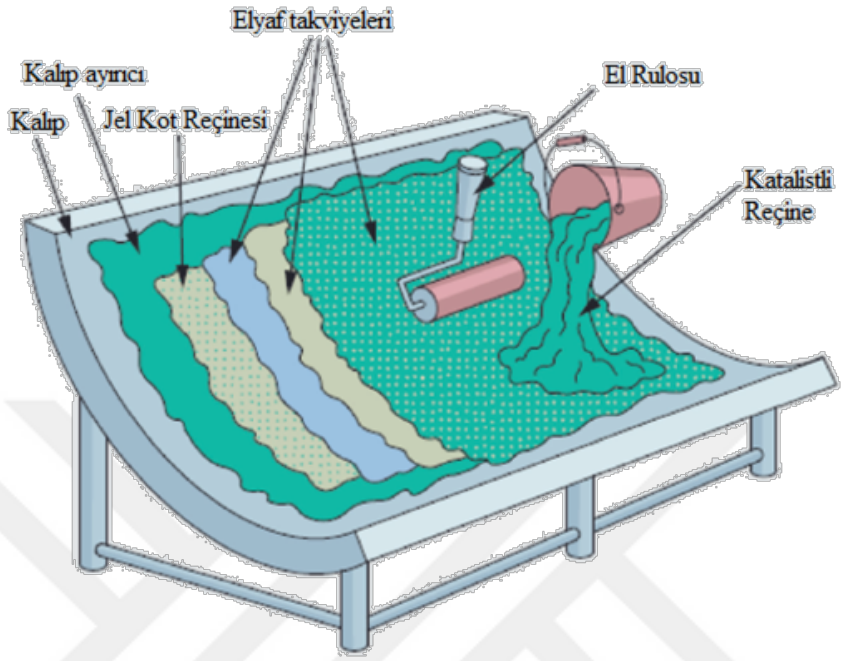


Şekil 2.17. UPR ve VER üretim teknolojilerine genel bakış.

2.5.1. El Yatırması Metodu

El yatırması polyester reçinelerin kullanıldığı ilk yöntemlerden biriydi. İşlem çok basit olmakla birlikte; dişi bir kalıpta cam elyaf mat veya dokuma kumaş formundaki elyaf takviyesinin, hızlandırıcı ve başlatıcı içeren matris reçine ile ıslatılması şeklindedir. Dokuma cam elyafı, cam elyaf mat ve örme kumaşlar gibi farklı takviye formları tek başlarına ya da birbirleriyle birlikte kullanilebilmektedir. Bu işlemde genellikle önceden hızlandırıcı içeren ve sadece metil etil keton peroksit gibi bir keton peroksit olan katalizörün eklenmesini gerektiren oda sıcaklığında kürleşme reçineleri kullanır. Kullanılan hammadde ve ekipmanlar oldukça basit ve pahalı olmasa da, tüm işler manuel olarak yapıldığından önemli işçilik maliyetleri söz konusudur. Bu, uygulayan operatörün niteliğine, yetenek ve deneyimlerine bağlı olarak bazı kalite farklılıklarına

da yol açabilir. El yatırması işlemi genellikle prototip hazırlamak için uygulanır ve küçük parti veya diğer standart tekniklerle kolayca üretilemeyen çok büyük nesneler için uygun bir yöntemdir. Şekil 2.18'de, el yatırma işlemi gösterilmiştir [77].



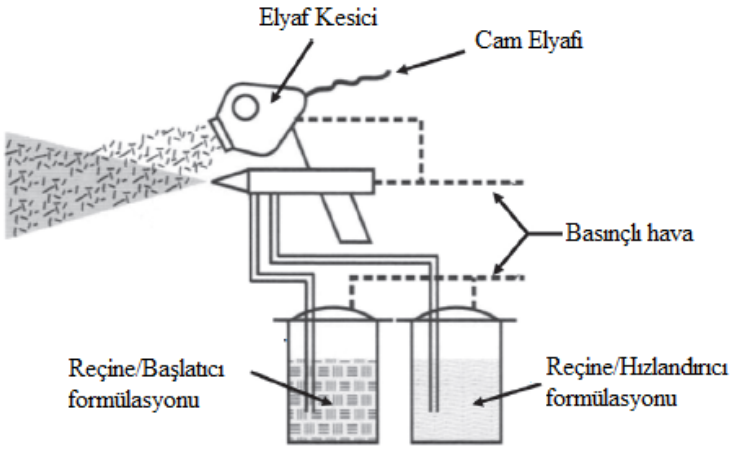
Şekil 2.18. El yatırması işleminin şematik gösterimi.

Çoğu zaman, kalıp yüzeyine bir kalıp ayırıcı (tipik olarak PVA, balmumu veya PTFE/silikon) uygulanmasından sonra, kalıba pigmentli bir jel kot reçinesi ile kaplama uygulanır ve takviye ve reçine ile laminasyondan önce jelleşmesine ve kısmen kürlenmesine izin verilir. Jel kot kaplamanın işlevi, elyaf yüzeyinden son yüzeye baskı yapmayı önlemek ve elyaf malzemesini dış etkenlerden korumaktır. Oda sıcaklığındaki jel kot kaplamalarda genellikle, küçük katalizörlü jel kot kaplama grupları kullanan püskürtme ekipmanı veya gerekli miktarda katalizörü kalıp üzerine püskürtülürken jel kot kaplama reçinesini de enjekte eden ve harmanlayan katalizör enjektör tabancası kullanilerak uygulanır. Jel kot reçinesi kaplama tabakasının kalınlığı, sertleştirilmiş halde 1 mm'den 15 ile 20 mm'ye kadar değişebilir. Kalıplamada hassas kalınlık kontrolünün sağlanması zordur. İşlem kalıp tarafında yüksek dereceli bir yüzey verir. Özellikle yüksek kaliteli yüzeyler için, kısmen güçlendirilmiş jel kot kaplamaya yüzey takviyesi için bir cam elyaf kumaş yerleştirilebilir. Jel kaplamanın uygulanmasından ve kısmi kürleştirilmesinden sonra, sıvı reçine ve takviye malzemesi alternatifli olarak tabakalar halinde uygulanır. Reçine, el rulosu ile ıslatma veya püskürtme şeklinde uygulanır. Her tabakadan sonra, elyafların reçineyi emmesi ve sıkıştırılması fırçalar

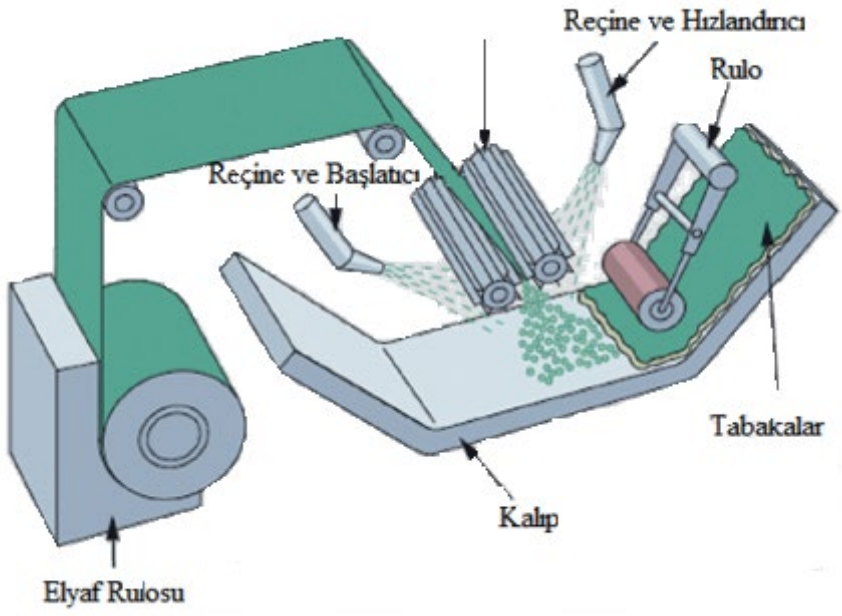
veya el ruloları ile gerçekleştirilir. Sıkışmış havanın kompozit içindeki küçük çentikler vasıtasıyla mekanik mikro-kusurlar meydana getirmesinden dolayı, bu süreçten hava kabarcıklarının hariç tutulması önemlidir. El yatırması için reçineler, döşemenin dikey bölümlerinde reçine drenajını en aza indirebilmek için genellikle tiksotropiktir. Oda sıcaklığında kür sistemleri neredeyse her zaman kullanılır. El yatırması işi için her çeşit stiren içerikli polyester birleştirilebilir. Stirenin bir kısmının, ayrışmayı arttırmak için metil metakrilet ile değiştirilmesi veya monomer emisyonlarını azaltmak için parametil stiren de mümkündür. Stiren içeren vinil ester reçineler oda sıcaklığında el yatırması kalıplamada kullanılmak için önerilebilir. El yatırması genellikle vinil esterlerle kullanılır, çünkü büyük ölçüde amaçlandıkları büyük ve kimyasal olarak dayanıklı ekipman parçaları bu kalıplama yöntemiyle kolayca üretilir. Elyaf takviyesinin derecesi, kullanılan elyaf malzemesinin türüne bağlı olarak değişir. Tipik olarak, cam elyaf kumaşlar kullanıldığında yaklaşık ağırlıkça %35 ile %45'e kadar cam elyafı takviyesi kullanımı yaygındır [93]. El yatırması işleminin en büyük dezavantajları (1) kalıplanmış parçalarda yalnızca bir iyi yüzeye sahip olması, (2) işçiliğin yoğun olması ve bu nedenle tüm ürünler için ekonomik olamaması, (3) üretilen parçaların tekrar üretilebilirliğinin mükemmel olmaması ve (4) genel olarak küçük mekanik performanslı parçalara neden olan, el yatırması sırasındaki hava sıkışması sorununun tamamen önlenememesidir.

2.5.2. Püskürtme Metodu

El yatırması işleminin kısmen otomatik bir şekli olan püskürtme metodunda, püskürtme tabancalarına başlatıcı enjeksiyon püskürtme ekipmanı ve küçük elyaf kesiciler takılmıştır. Bu gelişmeler hızlandırıcılı ve başlatıcılı reçine ve kesilmiş cam elyafın aynı anda kalıplara uygulanmasını sağlamıştır. Kesilmiş elyaf takviyesi, püskürtme sırasında reçine tarafından kısmen ıslatılır. Tipik olarak, elyaflar 20 ile 50 mm ‘lik uzunluklara kesilir. Islanma ve sıkıştırmayla havanın alınması, döşemeyi, el yatırması işlemine benzer şekilde özel el ruloları ile tamamlanır. Endüstriyel uygulamalara örnek olarak Şekil 2.19 ve Şekil 2.20’de verilmiştir [77].



Şekil 2.19. Püskürtme işleminin şematik gösterimi.



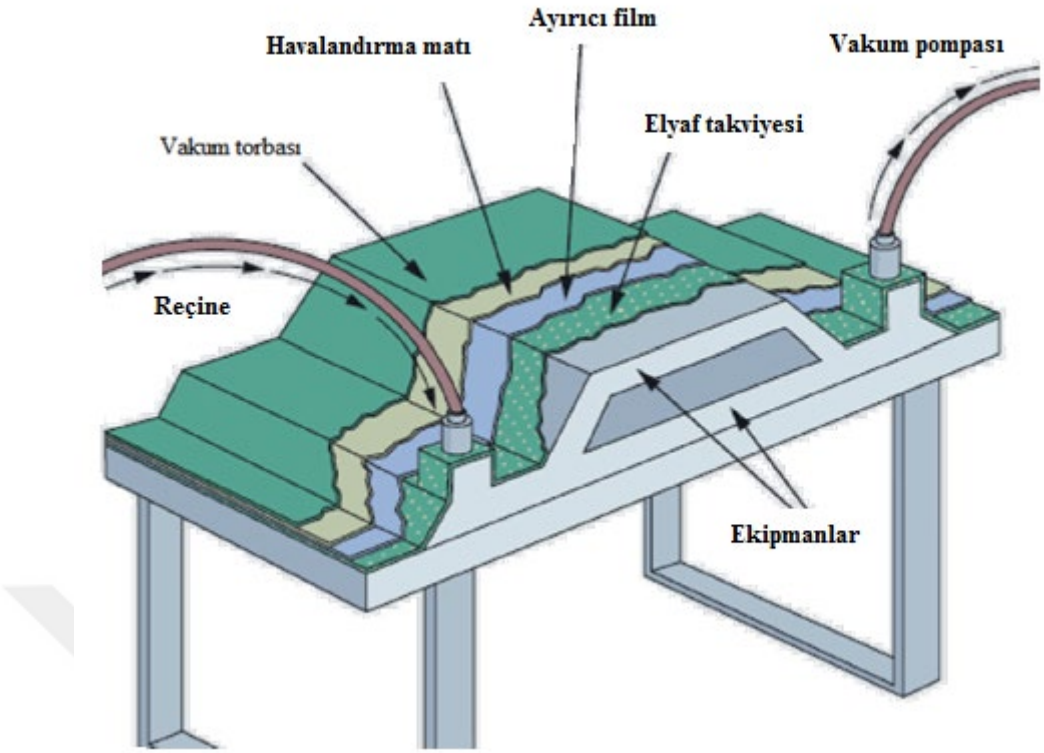
Şekil 2.20. Otomatik püskürtme yerleştirme işlemi.

Püskürtme tabancası, matris sisteminin geçici olarak kürleşmesini önlemek için genellikle iki ayrı rezervuardan reçine hızlandırıcı ve reçine sertleştirici karışımlarını birlikte verir. El yatırmasında olduğu gibi, oda sıcaklığında kürleşme reçineleri pigmentli jel kot reçine kaplamalarla birlikte kullanılır. Benzer şekilde, kalıplama sadece bir adet iyi yüzeye sahiptir ve kalıpta kalınlığın hassas bir şekilde kontrol edilmesi zordur. Elyaf kontrolü ve reçine katmanındaki tekrar üretilebilirlik, bilgisayar kontrollü kalıplar veya püskürtme robotları kullanilerak iyileştirilebilir. Püskürtme yerleştirme için kullanılan araçlar da nispeten basittir; yine tek parça, açık kalıplarla

çalışılmış ve potansiyel otomasyonundan dolayı el yatırmasından daha ekonomiktir. El yatırması işlemine kıyasla bir avantajı da, oldukça yüksek malzeme uygulama oranları olmasıdır. Bununla birlikte, nihai kompozit içindeki elyaf takviyesinin nispi yüzdesi daha düşüktür. Sprey döşeme, küçük ürün grupları ve büyük boy parçalar üretmek için uygundur. Reçine elyaf karışımını doğrudan alt tabaka üzerine püskürtmek suretiyle elyaf takviyeli yüzey kaplamalarının uygulanması için de kullanilebilir. Elyaf takviyeli UPR'lerin, sıhhi tesisat gibi vakumla oluşturulmuş akrilik eşyaların yapısal bir yedeği olarak uygulanması zamanla doymamış polyesterler için büyüyen bir uygulama haline gelmiştir. Vakumla şekillendirilmiş akrilikler, kalıplanmış eserin servis yüzeyi haline gelir ve üretim sırasında, genellikle kesme tabancası püskürtme döşeme yöntemiyle uygulanan polyester ve doğranmış cam elyafının yedeklenmesi için kalıp görevi görür. Akrilik ile polyester cam elyaflı yedek laminat arasında iyi yapışmanın geliştirilmesi bu imalat tekniğinin başarısı için çok önemlidir. Oda sıcaklığında kürleşme için yapışmayı maksimuma çıkarmak için özel olarak formüle edilmiş tiksotropik reçineler genellikle kullanılır.

2.5.3. Reçine İnfüzyonu Metodu

Reçine infüzyon işleminde, kompozit takviye katmanları dişi bir kalıba uygulanır. Daha sonra bir sızdırmazlık katmanı uygulanır ve reçineyi emmesi sağlanır. Takviye elyafının reçine ile ıslatılmasına yardımcı olmak için, sıvı reçineye ıslatmaya zorlayan bir vakum uygulanır. Reçine infüzyon işleminin şematik gösterimi Şekil 2.21'de verilmiştir [77]. Temel olarak püskürtme işleminin gelişmiş bir şekli olan vakumlu torbalama işleminde, vakum destekli reçine penetrasyonu, gözenekli bir film, silikon bazlı vakum membranının, sprey veya el yatırmasında uygulandığı gibi, tabaka yapilerının üzerine uygulanmasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu şekilde hem takviye elyafı, hem de UPR'yi kaplayarak kalıp tahliye edilmektedir. Atmosferik basınç daha sonra sıvı reçineyi malzemeye tamamen nüfuz etmeye zorlar. Vakumlu torbalama fazla reçineyi dışarı çektiğinden, hava alma malzeme tabakası vasıtasıyla fazla reçine bir çıkış yoluyla toplanır.



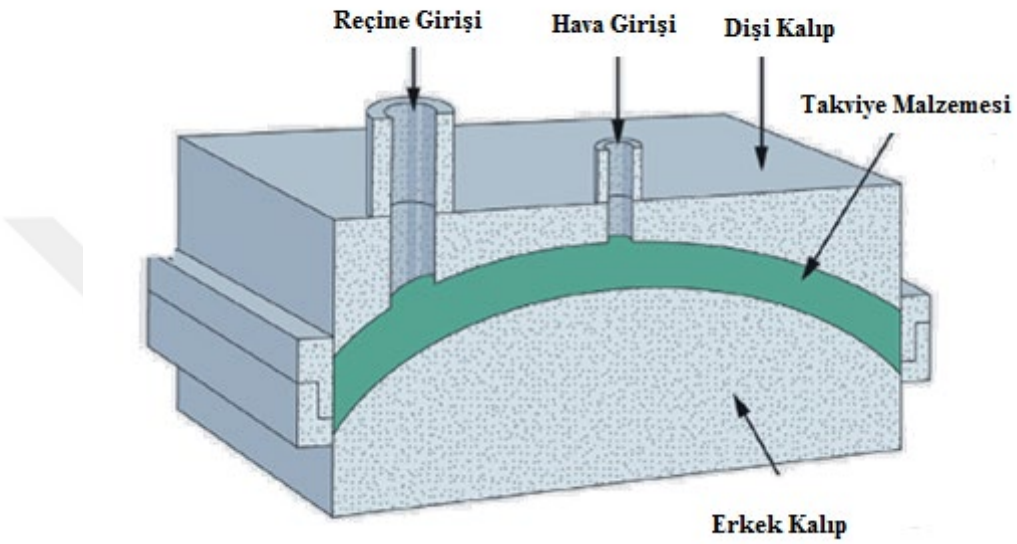
Şekil 2.21. Reçine infüzyon işleminin şematik gösterimi.

Püskürtme tabakası ya da reçine infüzyonu ile tabaka birikmesi yerine, hali hazırda önceden emdirilmiş elyaf kumaşları dişi forma tatbik edilebilir ve daha sonra benzer bir şekilde tahliye edilebilir (ön işleme). Alternatif olarak, bir dişi kalıba vakum uygulamak yerine, basınç torbası işleminde basınçlı, sızdırmaz bir erkek kalıp kullanilebilir. 8 bara kadar yüksek basınç uygulanarak, malzemenin daha da iyi bir şekilde sıkıştırılması elde edilebilir. Bununla birlikte, kalıp, vakum bazlı yöntemlerden çok daha yüksek mekanik yüklere dayanacak şekilde yapılmalıdır.

Diğer bir gelişme, elyaf takviyeli UPR'lerin emdirilmesini, sıkıştırılmasını ve katılaşmasını/kürleşmesini işlemek için bir otoklav kullanmaktır. Otoklavlarla belirlenmiş sıcaklık, basınç ve vakum programları gerçekleştirilebilir. Nispeten daha pahalı olan ekipman ve pahalı imalat olmasına rağmen, yüksek kaliteli parçalara ihtiyaç duyulduğunda çok gelişmiş imalat hassasiyeti mümkündür. Tipik uygulamalar bu nedenle havacılıkta kullanılmaktadır. Otoklavdaki izotropik basınç koşulları nedeniyle, karmaşık üç boyutlu şekillerin hazırlanmasına bile uygundur.

2.5.4. Reçine Transfer Kalıplama (RTM) Metodu

RTM, 1950 yılında geliştirilen “Makro Yöntemi” olarak adlandırilen eski bir kalıplama yönteminin modern bir versiyonudur. Prensipte, süreç, hem enjeksiyon kalıplama hem de presleme özelliklerini birleştiren düşük basınçlı bir yaklaşımdır. Çalışma prensibi, Şekil 2.22'de gösterilmektedir [77].



Şekil 2.22. Reçine Transfer Kalıplama (RTM) işleminin şematik gösterimi.

Bu yöntemde bir erkek ve bir dişi kalıp kullanılır. Kullanılan takviye iki kalıp arasına yerleştirilir. Cam elyaf kumaşlar veya PUR bazlı yapısal köpükler gibi istenen herhangi bir takviye malzemesi kullanilebilir. Jel kot reçine kaplaması bir ya da her iki kalıp yarısında da kullanilebilir. Kalıbı, kalıp çevresi etrafına sıkı bir sızdırmazlık sağlanmasıyla birlikte sıkıştırdıktan sonra, başlatıcı ileve edilmiş reçine, kalıbın en yüksek noktasına yerleştirilmiş bir havalandırma deliğine yerleştirilmiş şeffaf bir tüpten bir pompa ile kalıba uygulanır. Reçine "transfer" ve havanın uzaklaştırılması, bazı işlemlerde havalandırma hattına bir vakum kaynağı eklenerek desteklenir. Proses orta büyüklükteki üretim hacimlerini imal etmek için uygundur. Üretilen ürünlerin kalitesi tipik olarak iyidir, çünkü uygulanan vakum veya basınç koşulları hava kabarcıklarının giderilmesini destekler ve nispeten yüksek oranda elyaf takviyesi yapılabilir. İşlemde genellikle oda sıcaklığında kürleşme reçineleri kullanır. Hem polyesterler hem de vinilesterler kullanilebilir. RTM için elle veya püskürtme serisinden ziyade daha kuvvetli kalıp konstrüksiyonu gereklidir, çünkü reçineyi kalıba ve takviye içine

uygulamak için basınç (ve belki vakum) kullanılır. Reçine akışını daha da geliştirmek için, özellikle oldukça karmaşık kalıplar ve uzun akış yolları kullanıldığında, yükseltilmiş işlem sıcaklıkları kullanilebilir. Basınç gereksinimlerini ortada tutmak ve takviye malzemesini ıslatmayı kolaylaştırmak için düşük viskoziteli reçineler gereklidir. Düşük ile orta ekzotermik reaksiyon gösteren reçineler tercih edilir çünkü sertleştirme esnasında polyester kompoziti tamamen kaplanır ve genellikle reçine kompozitleri olan kalıp parçaları ile izole edilir. Aşırı ekzotermik reaksiyon hasara neden olabilir veya faydalı kalıp ömrünü azaltabilir. Bu nedenle, çoğu durumda, özellikle büyük lotlar üretilirken veya sertleşme sırasında yüksek işlem sıcaklıkları geliştirilirken paslanmaz çelik de kullanılır. Şekil 2.23'te örnek olarak RTM teknolojisi kullanilerak üretilen bir ürün için tipik bir kompozit otobüs panelini göstermektedir.



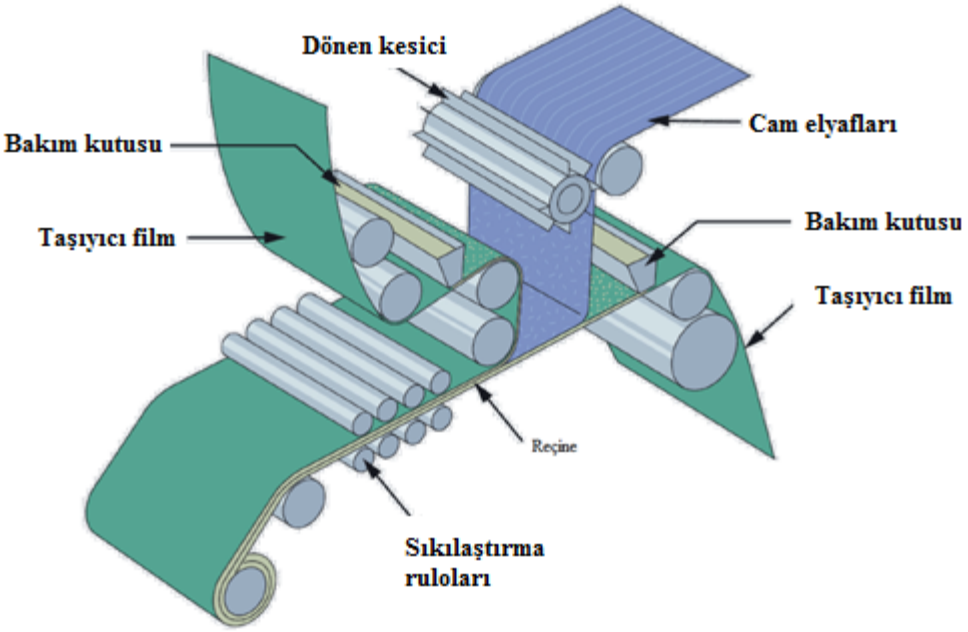
Şekil 2.23. RTM ile üretilen tipik bir kompozit otobüs paneli.

2.5.5. Sac ve Dökme Kalıplama Bileşikleri (SMC ve BMC) Metodu

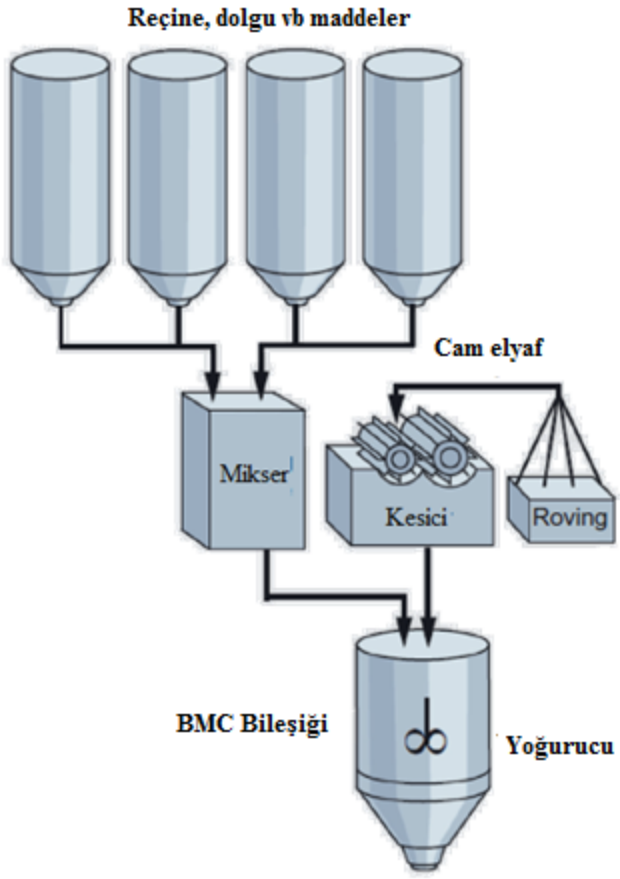
Sac ve Dökme Kalıplama Bileşikleri (SMC ve BMC) yapımında polyester veya vinilester reçineleri kullanilebilir. En yaygın kullanılan koyulaştırma sistemleri, Grup II metal oksitlerin ve hidroksitlerin, reçine üzerindeki karboksilik işlevli reaksiyonlarına bağlıdır. Koyulaşma reaksiyonu, belirli bir miktarda zincir uzatılmış yüksek moleküler ağırlıklı fraksiyonların oluşması ile sonuçlanır, bu daha sonra dolanma ve hidrojen bağıyla SMC'nin viskozitesini büyük ölçüde artırabilir. Sertleşme sırasında ortaya çıkan genleşme, polyester veya vinilester reçinesinin sertleşme büzülmesini dengeleyebilir. İyi bir SMC reçinesi ayrıca kalıplama kısmına enjeksiyonda ve kalıptan alınma sırasındaki hasarı en aza indirmek için iyi bir sıcaklık dayanıma sahip olmalıdır. SMC

için kalıplama sıcaklıkları genellikle 135 °C ile 149 °C arasındadır. SMC genellikle bu amaç için tasarlanan özel sürekli makinelerde yapılır. Genellikle, kalıplama reçinesi, düşük profilli reçine, dolgu maddesi, kalıp ayırma, katalizör, koyulaştırıcı ve pigmentten yapilen bir SMC macunu, sürekli bir taşıyıcı film ağı üzerine beslenir. Genellikle bir inç uzunluğunda kesilmiş cam elyafı, makine üzerindeki cam elyaf doğrama istasyonundan geçerken macun tabakasına bırakılır. Macun tabakasını ve doğranmış camı taşıyan film daha sonra SMC macunu tabakasına sahip olan bir üst taşıyıcı film ile sürekli olarak birleştirilir. İki film tabakası arasında yer alan ve SMC makinesindeki bir dizi merdane arasından geçen hamur yoğrulur ve sıkılır. Makinenin sonundaki bir taşıyıcı, daha sonra depolandığı bir "olgunlaşma" alanına transfer edilmek üzere uygun boyuttaki rulolar halinde makineden çıkarılmış olan SMC'yi yuvarlar. Yüksek oranda doymamış izoftalik ve propilen glikol maleat polyester reçineleri, SMC kalıplama için muhtemelen en sık kullanılan reçinelerdir. SMC macunu daha sonra 1 inç uzunluğunda bir SMC makinesinde birleştirilir, bitmiş SMC'de %25 ile %30 cam elyaf içeriğinde kesilir. SMC, ızgara açılış panelleri, kamyon kapakları ve davlumbazlar gibi otomotiv gövde parçalarının kalıplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. İş makinesi gövdeleri, uydu TV antenlerinin monte edildiği bölümler de büyüyen uygulamalardandır. Yüzme havuzu filtre tankları, oturma yerleri ve kar arabası gövdesi parçaları gibi diğer uygulama çeşitliliği de vardır.

BMC, büzülme kontrolü katkı maddesi polimeri içeren ve ayrıca bir miktar koyultma maddesi de içerebilen bir önkarışım bileşik olarak kabul edilebilir. Ön karışımda olduğu gibi, dolgu seviyeleri daha yüksektir ve takviye edici elyaf uzunlukları ve seviyeleri mat veya preform kalıplamada ve ayrıca SMC'de kullanılanlardan daha düşüktür. BMC, kaburgalar ve başlıklar gibi karmaşık özelliklere sahip olan ve kesici uçlar içerebilen elektrikli parçalar ve yuvalar gibi nesnelerde büyük uygulama alanı bulur. SMC (Şekil 2.24) ve BMC (Şekil 2.25) materyalleri arasındaki en büyük fark, kullanılan cam elyafların elyaf uzunluklarıdır [77]. BMC'de, yaklaşık 6 ile 12 mm uzunluğunda cam elyafı kullanılır, SMC'lerin içine gömülü cam elyafı daha uzundur (25 ile 50 mm). Ayrıca, nispi elyaf takviye miktarı SMC'de daha yüksektir, oysa işlem basınçları BMC ürünlerinden (110 ile 150 bar arasında) daha düşüktür (yaklaşık 50 ile 100 bar).



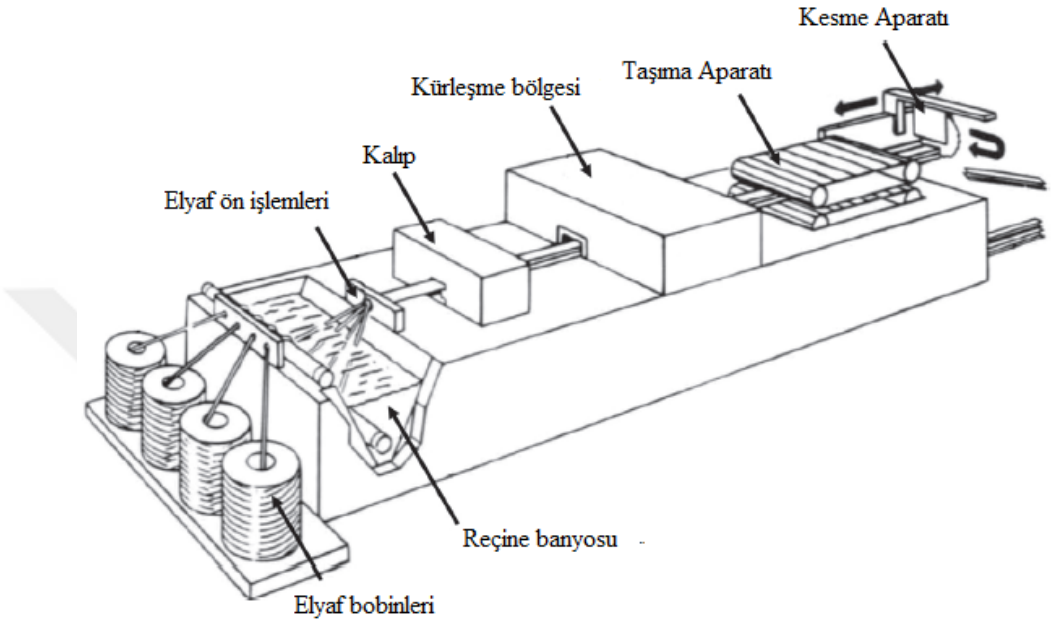
Şekil 2.24. SMC işleminin şematik gösterimi.



Şekil 2.25. BMC işleminin şematik gösterimi.

2.5.6. Pultruzyon Metodu

Hem polyester hem de vinil ester reçineler pultrusion işlemlerinde başarıyla kullanılır. Pultruzyon kompozitleri tipik olarak yüksek takviye seviyeleri içerirler. Sürekli bir reçine banyosu boyunca bir veya daha fazla ısıtılmış kalıp içinden takviyeler çekilerek yapılır. İşlem, Şekil 2.26'da şematik olarak tasvir edilmiştir [77].

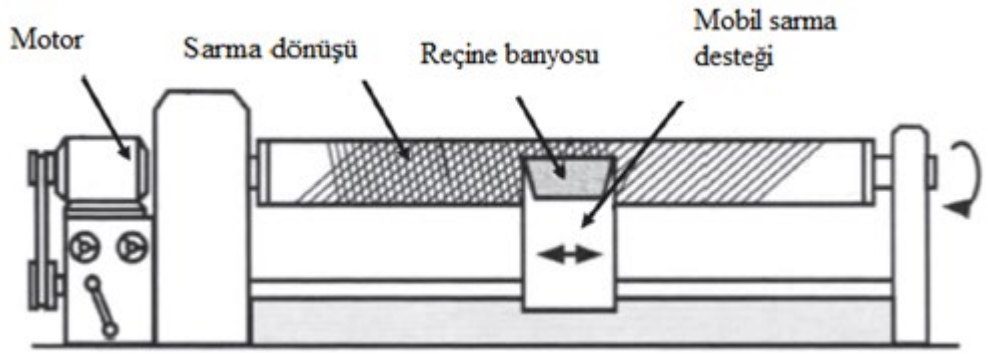


Şekil 2.26. Pultruzyon sürecinin şematik gösterimi.

Pultruzyon işlemi reçinelere eşzamanlı olarak birkaç talep getirir. Reçineler, dolgu maddesi içindeyken bile takviyeyi hızlıca ve tamamen ıslatmalı ve aşırı çekme yüklerinden kaçınmak ve yaygın olarak "kayma" olarak adlandırilen yüzey kozmetik kusurlarını önlemek için kalıp sıcaklıklarında yeterince yüksek bir mukavemet geliştirmelidir. Reçinelerin ısıl sapma noktası tatmin edici çekme hızlarının elde edilmesi için önemlidir. İzoftalik polyesterler muhtemelen pultruzyon için en yaygın kullanılan reçinelerdir. Pultruzyon kompozitleri, genel olarak yüksek takviye seviyeleri ve üretim yönüne paralel elyaflı takviye malzemesinin oryantasyonu nedeniyle, genellikle püskürtme yönüne paralel olarak olağanüstü yüksek fiziksel özelliklere sahiptir. Alternatif olarak, cam elyaflar yerine elyaf ağları takviye olarak da kullanilebilir. Çapraz bağlanmayı tamamlamak için, profiller kürleşme sonrası fırınlardan taşınır ve sonunda bir testere tarafından istenen uzunluklarda kesilir.

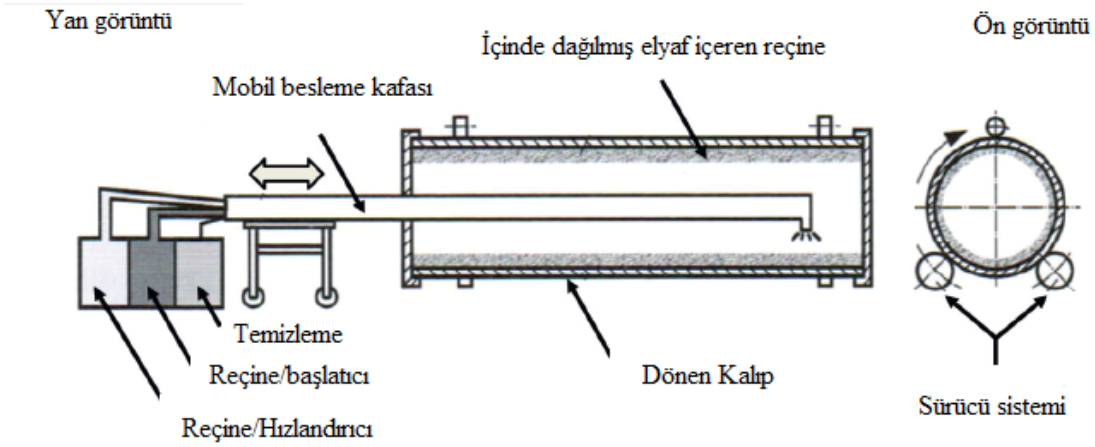
2.5.7. Sarma ve Santrüfüj Döküm Metodu

Borular veya çeşitli çaplardaki tanklar gibi silindirik parçalar, sarma işlemleriyle üretilebilir. Burada, reçineye doydukları bir daldırma banyosunu geçtikten sonra, takviye elyafları, kumaşlar bir sargı milinin etrafına sarılır. Birkaç kat reçine emdirilmiş kumaş uygulanabilir. Kompozitin geometrisi ve yapısı, elyafları ileten desteğin göreceli hareketliliği ile kontrol edilebilir. Boruların imalatı için sarma işlemi, Şekil 2.27'de şematik olarak gösterilmiştir [77].



Şekil 2.27. Sarma prosesi.

Alternatif olarak, silindirik parçalar ayrıca merkezkaç döküm kullanilerak da imal edilebilir. Bu durumda, reçine ve elyaf takviyesi dönen bir kalıba savurulur, merkezkaç kuvvetleri dönen tamburun iç yüzeyinde kompozit oluşturan malzemenin birikmesine neden olur (bkz.Şekil 2.28) [77].



Şekil 2.28. Santrifüj savurma prosesi.

2.6. POLİMER KOMPOZİTLERLE İLGİLİ LİTERATÜR TARAMASI

Khan ve ark., cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerde matris olarak kullanılan polyester ve vinilester reçineler üzerinde yapmış oldukları bir çalışmada artan basınç gerilme hızı ile bu iki reçine tipinin gerilme deformasyon davranışını değerlendirmişlerdir. Kompozitlerde reçine özelliklerinin etkisini açıklayabilmek amacıyla reçinelerin dayanımını ağırlıkça %42 kısa elyaf takviyesi içeren kompozitlerin dayanımı ile kıyaslamışlardır. 10 haftadan fazla kür süresi ile kalıplanan reçine plakalarından 10 mm küp şeklinde hazırlanan numuneler üzerinde basınç testleri gerçekleştirmişlerdir. Gerilme birim deformasyon davranışının artan gerilme hızına bağlı olarak lineer elastikiyet bölgesinde attığını ve maksimum gerilme değerinin ötesindeki akış gerilmesinde iki reçinenin arasında, anlamlı bir fark olduğunu belirlemişlerdir. Polyester reçinesi söz konusu olduğunda, akış gerilimi, özellikle yüksek gerilme oranlarında, maksimum gerilmeden önemli ölçüde ve hızla düştüğü halde, vinilester reçinesine ait numunelerde anlamlı olmayan kademeli bir düşüş meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Her iki reçine için lineer elastikiyet bölgesindeki gerilme ve maksimum gerilme değerleri kıyaslandığında polyester reçinenin her iki dayanım değerinin de vinilester reçineninkinden önemli ölçüde yüksek olduğu görülmüştür. Aynı şekilde polyester reçinenin ortalama modulus değeri vinilester reçineye göre %18 yüksek bulunmuştur. Sonuçlar değerlendirildiğinde vinilester reçinesinin yüksek gerilme oranlarında bile uyumlu kalma eğiliminde olduğu; buna karşılık, polyester reçinesinin ise kırılgan ve yüksek gerilme oranlarında daha az uyumluluk eğiliminde olduğu ve artan basınç gerilme hızının polyester ve vinilester termoset reçinelerin mekanik özelliklerini etkilediği görülmüştür. Kısa elyaf takviyeli kompozitlerin dayanım ve modulus tahminleri değerlendirildiğinde sadece karışım kuralına göre karar verilmesinin doğru olmadığı; ara yüzey dayanımı, elyaf yönleri, boşluklar gibi faktörlerin sonuçları etkilediği görülmüştür [94], [95].

Cherian ve ark., doymamış polyester reçinesi (UPR) ve felolik novalak epoksi reçine (EPN) bazlı hibrit polimer yapileri reaktif karışım ile sentezleyerek fiziksel, mekanik ve termal özelliklerini yorumlamışlardır. UPR, oda sıcaklığında bir katalizör (%60 peroksit içeren dimetil ftalat içinde çözülmüş metil etil keton peroksit) ve hızlandırıcı (hızlandırıcı (stiren içinde %6 kobalt naften çözeltisi)) ile sertleştirilerek, sırasıyla reçinenin ağırlığının %1'i ve %0,5'i konsantrasyonlarında kullanılmıştır. Reçine daha sonra bir uygun kalıplara dökülmüştür. Kürleştirme işlemi 24 saat oda sıcaklığında,

ardından 80 °C'de 3 saat süreyle bir hava fırınında yapılmıştır. Bu işlemlerden sonra mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan EPN reçinenin UPR ile oldukça iyi karıştığı ve ağırlıkça %5 EPN konsantrasyonlarında çekme dayanım, kopmadaki uzama ve sertlik özelliklerinin maksimum gelişme gösterdiği ve kürlenmiş UPR'nin çekme dayanımının %32 ye kadar, sertliğin ise %238 civarında büyük ölçüde arttığı bulunmuştur. Tokluk ve darbe direncindeki bu iyileşme değerlerini, diğer özellikleri ciddi şekilde etkilemeden elde etmişlerdir. EPN/UPR karışımları, termal stabilite ve sönümlemede de önemli bir gelişme göstermektedir. Aşınma kaybı EPN durumunda en az, enerji absorblama karakteristiği ise en iyi olarak gözlenmiştir. Sertleştirilmiş matrisin morfolojisi, SEM ile incelendiğinde, daha yüksek enerji emilimi ve geniş çaplı çatlama belirtileri gösterdiğini belirlemişlerdir. Sonuçlar, genel olarak epoksi reçineleri ve özel olarak EPN nin, düşük yüzdelerde UPR için modüfiye edici olarak kullanilebileceği ve karışımların özellikle elyafın az olduğu köşe gibi kısımlarda daha yüksek darbe yüklerine dayanabileceğini göstermektedir [7].

Banna ve ark., polyester ve bisfenol-A epoksi reçine numunelerini 1 hafta ve 4 haftalık süreler için, 25 ºC ve 75 ºC sıcaklıklarda 1 M H_2SO_4 asit çözeltisi ve Kobalt Elektrolitine maruz bırakmışlardır. Çekme Testi, Eğme Testi, mikro sertlik testi, ısıl Bozunma Sıcaklığı ve SEM analizlerini değerlendirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre polyester reçine 1 M H_2SO_4 asit çözeltisinde 1 hafta beklediğinde çekme dayanımı ve uzamasının çok düştüğünü belirlemişlerdir. Polyester reçineyi epoksi reçine ile kıyasladıklarında ise çözelti tipine bağlı olarak, yüksek sıcaklık ve test süresi uzun olduğunda modulüs değerinin daha fazla düşüş gösterdiğini tespit etmişlerdir. Her iki reçine için ortalama sertlik 2 hafta maruz kalma sonucunda artmış ve daha sonra sertlik, 4 hafta maruziyet sonrasında maruz kalmayana göre halen yüksek olacak şekilde azaldığını tespit etmişlerdir. Polyester mikroyapısının asit ve yüksek sıcaklığa maruziyet altında çatlakların içinde artan yüzey pürüzlülük, çatlak ve çatlakların içine kükürt yayılımı ile birden bozulduğunu, bisfenol A epoksi vinilester'in asite maruziyet sonucunda polyestere göre daha iyi mekanik sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir [96].

Dave ve Patel maleik anhidrit ve farklı aromatik diaminler arasındaki reaksiyon ile Doymamış balzamik asitler hazırlanmışlar ve doymamış balzamik asitler ile bisfenol-A (DGEBA) diglisidileterinin reaksiyonu ile de Doymamış poli (ester-amit) reçinesi (UPEAs) elde etmişlerdir. Akrile edilmiş UPEAs reçine elde edilmek için (yani, AUPEAs) ise Doymamış poli (ester-amit)lerin (UPEA) akrilesyonu gerçekleştirilmiştir.

Akrile doymamış bir poli (ester-amit) (AUPEAs) ile vinilester epoksi (VE) karışımlarının etkileşim reçinesi elde edilmiştir. APEAS ve AUPEAs, element analizi ve molekül ağırlığı ile (buhar basıncı Osmometer tarafından ve IR spektral çalışma ile ve termogravimetri ile) karakterize edilerek etkileşim karışımlarının kürleşmesi diferansiyel tarama kalorimetre (DSC) ile izlenmiştir. Elde edilen harmanların cam elyaf takviyeli kompozitleri DSC verilere göre hazırlanmış ve teknik, elektriksel ve kimyasal özellikleri karakterize edilmiştir. Katkısız karışımlar termo Gravimetrik analiz (TGA) ile karakterize edilmiştir. Testlerin sonucunda üretilmiş olan PEAI oluşumun ile reaksiyon sonucunda kimyasal olarak dirençli ve termal olarak kararlı UPEAI lar olduğunu, cam elyaf takviyeli laminasyonlarının ise kimyasal, mekanik ve elektriksel olarak mükemmel özelliklere sahip olduğunu tespit etmişlerdir [97].

Marouani ve ark., çalışmasında, sivil/yapı mühendisliğinde kullanılan FRP kompozitlerin dayanıklılığını incelemek için deneysel bir yaklaşım yapmışlardır. Karbon epoksi ve karbon vinilester kompozitleri 18 ay boyunca (termal, higrometrik, kimya, termokimyasal, hidrotermal, donma-çözülme döngüleri vb.) hızlandırılmış yaşlanmaya tabi tutmuşlardır. Mekanik çekme ve basma test sonuçlarını değerlendirdiklerinde inceledikleri kompozitlerin maruz kalma süresi ile nihai mekanik özelliklerinin iki aşamalı bir eğilim gösterdiğini görmüşlerdir. İlk aşamada maruz kalma sıcaklığının artması sonucu polimerik matristeki moleküler hareketliliğin etkinleştiğini ve mekanik özelliklerin arttığını belirlemişlerdir. İkinci aşamanın ise matrisin bozulmasına ve fiber-matris ara yüzünün zayıflamasına bağlı olarak hasar, özellikle mikro çatlakların ortaya çıkması, yayılması ve birleşmesinden sonra olan bozunma aşaması olduğuna karar vermişlerdir. İki fazın varlığını, camsı geçiş sıcaklığı Tg'yi izleyerek doğrulamışlardır [98].

Jin, Park çalışmalarında epoksi reçine olarak bisfenol-A (DGEBA) nın dolgu olarak nano-Al_2O_3 veya nano-SiC parçacıkları ile nano skalasında dolgulu epoksi reçineli hibrid kompozitler hazırlamıştır. Bu kompozitlerin kürleşme davranışı, termal stabilite, dinamik mekanik özellikler gibi termal özelliklerini incelenmişlerdir. Deneylerin sonucunda kompozitlerin DSC eğrisi pik sıcaklığının artan dolgu içeriği ile birlikte azaldığını ve saf epoksi reçineye göre yaklaşık 10 ºC daha yüksek camsı geçiş sıcaklığına sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Kompozitin camsı ve kauçuğumsu bölgelerindeki termal genleşme katsayısı artan dolgu içeriği ile birlikte azaldığını

belirlemişlerdir. Sonuçlara göre epoksi reçinenin termal kararlılığını iyileştirmek için nano-Al_2O_3 veya nano-SiC parçacıkları ileve edilmesini önermişlerdir [99].

Gopinatha ve ark., araştırmalarında, elyaf uzunluğu 5-6 mm olan kenevir elyafları ile elyaf takviyeli kompozitler hazırlanmıştır. Matrix olarak polyester ve epoksi reçine kullanarak; 18:82 elyaf-reçine ağırlık yüzdelerinde olacak şekilde kompozitleri sentezlenmişlerdir. Hazırladıkları kompozitleri çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, darbe dayanımı ve sertlik testlerine tabi tutmuşlardır. %5 NaOH ile muamele edilmiş kenevir elyafı takviyeli kompozitlerin %10 NaOH ile muamele edilmiş elyafla güçlendirilmiş epoksi kompozitinden %18,67; polyester kompozitlerde ise %16,67 daha yüksek bir çekme dayanımına sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Benzer şekilde %5 NaOH ile muamele edilmiş elyaf takviyeli polyester kompozitlerin, eğilme mukavemetinde %10 NaOH ile muamele edilmiş kenevir elyafı takviyeli polyester kompozitlere göre %15,6 artış olduğu, kenevir-epoksi kompozitlerinde ise bu artışın %20 oranında olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuçları değerlendirdiklerinde kenevir elyaf takviyeli epoksi kompozitin kenevir elyaf takviyeli-polyester kompozitten daha iyi mekanik özellikler sergilediğini belirlemişlerdir [100].

Espinel ve ark., çalışmalarında mekanik özelliklerinde değişiklik gösteren deniz inşaat mühendisliği uygulamaları için en uygun kompozit malzemelerin belirlenmesi için deniz suyu ortamının etkisini araştırılmışlardır. Deniz suyunda dayanıklılık konusunda çok önemli olan matris özelliklerini araştırmak amacıyla polyester, vinilester ve epoksi matris kompozitleri üzerinde çalışmışlardır. Epoksi/cam kompozitlerin %0,4 nem doygunluk seviyesine 30 gün boyunca ulaşarak bu seviyeden sonra stabil olduğunu; çekme dayanımında değişiminin 90 gün boyunca %23,81 ve eğilme dayanımında ise %35,29 olduğunu tespit etmişlerdir. Neme doygunluk sonrası cam/polyester kompozitlerin çekme dayanımının dengelendiğini ancak esneme oldığını görmüşlerdir. Cam/vinilester kompozitlerin nem doygunluk seviyesine ulaştıktan sonra gerilme ve bükülme mukavemeti stabilize görünmemiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde deniz suyu uygulamalarında kullanilecak en uygun matrisin epoksi olduğu sonucuna varmışlardır, çünkü epoksi reçinede su doygunluk seviyelerine ulaştıktan sonra mekanik özelliklerinin stabilize olduğunu görmüşlerdir [101].

Ou, Zhu yapmış oldukları çalışmada Cam elyaf kompozit (GRP) numunelerin mekanik özellikleri ve kusur tipleri üzerinde olası etkilerini araştırmak için 25 ºC ile 100 ºC sıcaklıklar aralığında 160 s^{-1}'ye kadar farklı gerilme oranlarında testler

gerçekleştirişlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçlar ile çekme dayanımı, maksimum gerilme ve tokluk özelliklerinin oda sıcaklığında artan gerilme hızları ile arttığını ve 40 s^{-1} gerilme hızında artan sıcaklıklar ile Young modulusu ve çekme dayanımı ve tokluk özelliklerinin azaldığını belirlemişlerdir. GRP nin tokluk ve Çekme dayanımının artan gerilme oranı ile arttığını; GRP nin Young's modulusü ve Çekme dayanımının artan sıcaklık ile azaldığını tespit etmişlerdir. GRP maksimum strain değeri 25 ºC-50 ºC bir sıcaklık aralığı üzerinde hemen hemen sabit kaldığını ve GRP kusur tiplerinin test koşullarına bağlı olduğunu görmüşlerdir [102].

Li ve ark., epoksi reçine özelliklerini geliştirmek amacıyla yapmış oldukları çalışmada dolgu olarak öğütülmüş kalsiyum karbonat kullanımı sonucu eğilme dayanımı, basınç ve darbe dayanımı özelliklerinde büyük bir artış gözlemişlerdir. Sertleştirme mekanizmasını taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ile incelemişlerdir. SEM sonuçları, epoksi matrisi ve dolgu maddeleri (kum ve öğütülmüş kalsiyum karbonat) arasında mükemmel bir ara yüz sınırının olduğunu görmüşlerdir [103].

Hawa ve ark., E-cam elyafı ile takviye edilmiş epoksi reçineli kompozit borular üzerinde yaşlanma ve darbe yüklerinin etkilerini araştırmak için yapmış oldukları çalışmada, ±55º sarma açısı ile filement sarma metodu ile borular üretmişlerdir. Test numuneleri bu borulardan alınmıştır. Numuneleri 80 °C musluk suyuna daldırıldıktan sonra 500, 1000, 1500 saat zaman aralıkları için yaşlanma işlemine tabi tutmuşlardır. Aynı numuneleri daha sonra, üç farklı enerji seviyesindeki (5 J, 7,5 J ve 10 J) darbe yükleri uygulayarak akabinde patlama testleri yapmışlardır. Taramalı elektron mikroskobu ile test numunelerinin görüntüleri çekilerek yaşlanma zamanı ile darbe enerjisi seviyesinin boruların patlama dayanımı 'üzerindeki etkisi arasındaki korelasyonu tespit etmişlerdir. Test sonuçları darbe enerjisi arttıkça maksimum kuvvet ve deplasmanda da artış olduğunu göstermiştir. Patlama test sonuçları, yaşlandırilen numunelerin daha yüksek enerji ile düşük patlama dayanımı verdiğini ortaya koymuştur. Uygulanan darbe enerjilerine bağlı olarak sızma ve püskürme kusurlarını gözlemlemişlerdir [104].

Benmokrane ve ark., yaptıkları çalışmada, ilk olarak vinil-ester, izoftalik polyester veya epoksi reçineler ile yapilen GFRP çubuklarının fiziksel ve mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Daha sonra beton ortamını simüle edecek şekilde bu çubukların alkali solusyona maruz kalma durumunda uzun vadeli performansını değerlendirilmişlerdir. Alkali solüsyonuna maruziyet testi 1000, 3000 ve 5000 saat

boyunca 60 ºC sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Daha sonra çubuk özellikleri şartlandırılmamış olan referans örneklerine göre değerlendirilmiştir. Test sonuçlarına göre, vinilester ve epoksi çubuklarının alkalide şartlandırmadan sonra en iyi fiziksel ve mekanik özellikler ve en düşük bozunma hızı gösterirken, polyester çubukları en düşük fiziksel ve mekanik özellikler göstererek ve şartlandıktan sonra fiziksel ve mekanik özelliklerinde önemli bozulma sergilediğini tespit etmişlerdir [105].

Oliveiraa ve ark., doğal elyaflarla takviye edilmiş kompozitler ile ilgili olarak yapmış oldukları çalışmada doğal okaliptus elyafları ile güçlendirilmiş ve matris olarak epoksi ve polyesterin kullanıldığı polimerik kompozitlerin çekme mekanik özelliklerini kıyaslamışlardır. Sonuçlar, her iki durumda da okaliptus elyaflarının kullanımının matris donanımı üzerinde çok az etkisi olduğunu göstermiştir [106].

Gopinatha ve ark., yapmış oldukları araştırmada, fiber takviyeli kompozit numunelerini elyaf uzunluğu 5-6 mm olan kenevir elyafları ve polyester ve epoksi reçine matrisleri ile hazırlamışlardır. Kompozit numunelerini ağırlıkça 18:82 elyaf-reçine yüzde oranında sentezlenmişlerdir. Hazırlanan kompozitlerin çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, darbe mukavemeti ve sertlik gibi mekanik özelliklerini incelemek için test etmişlerdir. Epoksi-kenevir elyaf takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı polyester-kenevir kompozitlere göre %34,9, çekme modülü ise %29 daha yüksek çıkmıştır. Sertlik değerlerinde kayda değer bir fark bulunmamıştır. Sonuçlar kenevir elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin kenevir elyaf takviyeli polyester kompozitlere göre daha iyi mekanik özellikler sergilediğini göstermektedir [100].

Woo ve ark., çalışmalarında vakumlu reçine transfer kalıplama prosesine uyum sağlayabilecek kadar düşük viskoziteli ve 180 ºC civarında yüksek camsı geçiş sıcaklığına sahip yeni bir epoksi reçine geliştirmişlerdir. Reçinenin kürleşme davranışı ve viskozite değerini çalışabilmek için çok fonksiyonlu reçine, aromatik sertleştirici ve reaktif seyrelticiler kullanilerak birkaç karışım formüle edilmiştir. Bu bileşenlerin viskozite ve camsı geçiş sıcaklığı üzerindeki etkilerini, termomekanik analiz, dinamik taramalı kalorimetre ve reometre ile incelemeleri sonucunda elde ettikleri deneysel sonuçlar, viskoziteyi 40 °C'de 1 Pa.s'den daha az bir değere düşürmek için sıvı bir aromatik kürleştiricinin ve çok işlevli epoksi reçinesinin kullanılması gerektiğini göstermiştir. Uygun bir reaktif seyrelticinin eklenmesi ile 40 ºC'deki viskozitenin 0,71 Pa.s ye düştüğünü ve bununla beraber camsı geçiş sıcaklığının bozulmasını en aza indirdiğini, camsı geçiş sıcaklığını 185,8 ºC olarak tespit etmişlerdir. Optimize edilmiş

harmanla üretilen kompozitin mekanik özellikleri, hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklık koşullarında değerlendirildiğinde, yeni kompozit, mevcut ticari reçineninkiyle karşileştirilebilir mekanik özellikler göstermiştir [107].

Carbas ve ark., kürleşme sıcaklığının üç farklı epoksi matrisin camsı geçiş sıcaklığı ve rijitliği gibi fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi açıklanmak amacıyla yapmış oldukları çalışmada, deney sonuçlarına göre en yüksek dayanımın elde edildiği kürleşme sıcaklığı ilk reçine numunesi için 40 ºC ile 60 ºC arasında, ikinci numune için 100 ºC'de ve üçüncü numune için ise 100 ºC ile 120 ºC arasında olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuç olarak kürleşme sıcaklığının altında sertleştirildiği zaman mekanik özellikler daha yüksek, tersi durumda ise daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Her iki durumda da camsı geçiş sıcaklığı kürleşme sıcaklığından daha yüksek çıkmıştır [108].

Šturm ve ark., nem absorpsiyonunun cam takviyeli polyester kompozitler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. 250±50 g/m^2 özellikteki elyaflardan oluşan 6 tabakayı farklı tipteki ortoftalik polyester reçineler ile ıslatarak plakalar elde etmişlerdir. Kullanılan reçineler sırasıyla orta reaktiviteli, kimyasal olarak dayanıklı ve hızlandırıcı içeren tiksotropik reçinelerdir. Plakaları 5 gün boyunca 50 ºC'de fırınlayarak şartlandırmışlardır. Distile suyun içerisinde 3, 6, 9, 12, 20, 40 ve 100 günlük sürelerde bekletilen numunelerin su adsorbsiyonu hesaplanmıştır. Bu testler sonucunda numunelerin difüzyon katsayıları kıyaslandığında en düşük olarak hızlandırıcı içeren tiksotropik reçinenin değeri 9,55x10^{-13} olarak bulunurken, kimyasal olarak dayanıklı reçineninki 1,53x10^{-12}, orta reaktiviteli reçineninki ise 1,81x10^{-12} olarak tespit edilmiştir. Diferansiyel mekanik analizlerinde kimyasal olarak dayanıklı reçinenin camsı geçiş sıcaklığı orta reaktiviteli reçineninkinden 10 ºC yüksek olarak tespit edilmiştir. Bu reçinenin mekanik test değerleri de diğer reçinelere kıyasla %15-25 arasında daha iyi bulunmuştur [109].

Amaro ve ark., cam takviyeli epoksi kompozitleri hidroklorik asit ve sodyum hidroksit çözeltilerine maruz bıraktıktan sonra eğilme ve darbe dayanımlarını araştırmışlardır. Laboratuvarda hazır cam elyaf kumaşlardan kompozit laminatlar hazırlanarak ve otoklav/vakumla kalıplama işlemini kullanarak aynı tabaka tasarımı ile üretici tavsiyelerine uygun olarak üretmişlerdir. Örnekler tamamen hidroklorik asit (HC1) ve sodyum hidroksit (NaOH) içine daldırarak 12, 24 ve 36 günlük maruz kalma süresilerini uygulamışlardır. Solüsyondan bağımsız olarak maruz kalma süresine göre eğilme

dayanımı ve eğilme modülü azalmıştır. Alkali solüsyonda bu düşüş daha fazla olarak tespit edilmiştir. Aynı eğilimi darbe dayanımı için de gösterdiği görülmüştür [110].

Zhang ve ark., vinilester reçinenin kürleşmesi, jelleşme süresi, dinamik reolojik davranışı ve mekanik özellikleri üzerinde izotermal sıcaklık etkilerini araştırdıkları çalışmada kullandıkları vinilester reçineleri ilk olarak 4 saatlik izotermal kürleşmeye tabi tutarak ardından 0,5 saat 85 ºC'de post-kür uygulamışlardır. Sertleşme derecesi hesaplanması sonucunda izotermal sıcaklık arttıkça arttığını gözlemlediler, 80 °C'de izotermal bir şekilde kürlendiğinde, reçinenin sertleşme derecesi 0,87'ye ulaşabildiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, sıcaklık ile viskozite değişimi nedeniyle, kürleşme öncesi ve sonrasında sertleşme derecesindeki artışın, izotermal sıcaklığı arttırmakla azaldığı ve en yüksek değer olarak, 40 °C'lik bir izotermal sıcaklığı ile kürlenen numuneye karşılık geldiğini tespit etmişlerdir. Jel süresinin, izotermal sertleşme sıcaklığının artmasıyla azaldığını ve 80 °C'de, reçine, 19,28 s'ye ulaştığını gözlediler. Sertleştirilmiş vinilester reçinelerin depolanma ömrü ve modülü cam geçişine sıcaklık arttıkça önce azaldığını ve sonra arttığını gözlemlemişlerdir [111].

Vinay ve ark., polimer bazlı hibrit kompozitlerin çekme ve eğilme yüklerine maruz kaldıklarınsa gelişen kusur prosesini deneysel olarak analiz etmek için yapmış oldukları çalışmada; kevlar/karbon elyaflı vinilester reçine ve cam/karbon elyaflı vinilester reçine hibritlerini elyaf ve matris ağırlıkça oranları %60 ve %40 olacak şekilde ve elyaf yönleri 0º ve 90º olarak farklı kombinasyonlarda el yatırması metodu ile 6 adet plaka üretmişlerdir. Cam ve karbon elyafı tek bir mat kumaş şeklinde ve kevlar ve karbon elyafı de her biri tek bir mat kumaş şeklinde vinilester reçine ile ıslatılmıştır. Vinilester reçinenin kürleştirilmesinde hızlandırıcı olarka kobalt naftanat, başlatıcı olarak metil etil keton peroksit kullanılmışlardır. Hazırladıkları laminatı 3 saat boyunca 30 ºC'de koşullandırmışlardır. Çekme dayanımı kıyaslandığında cam elyaf 0º ve karbon elyaf 90º kullanıldığı numune kompozitinin daha iyi bir gelişme gösterdiğini görmüşlerdir. Bunun sebebini reçine ve elyaf arasındaki yapışmayı geliştiren yüzey reformu olarak yorumlamışlardır. Eğilme dayanımı incelendiğinde yine aynı numune kompozitin dayanım değeri daha yüksek bulunmuştur. Shore D sertlik testinde ise cam ve karbon elyaf 0º ve kevlar ve karbon elyaf 90º kullanıldığı kompozitinin en yüksek değere sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Bu numune kompozitler için elyaf-matris ara yüzeyindeki tutunmamın çok mükemmel sağlandığı sonucuna ulaşmışlardır [112].

Alia ve ark., kürleştirdikleri vinilester reçineleri yüksek sıcaklık ve bağıl nem altında yaşlandırarak yapilerındaki, mekanik ve yapışma özelliklerindeki değişiklikleri çalışmışlardır. Çalışmalarında bisfenol-epoksi içeren iki komponentli vinilester reçine kullanmışlardır. Reçine numunelerini hazırlarken bu iki komponenti cam bir kapta 5 dakika elle karıştırdıktan sonra 24 saat oda sıcaklığında kürleşmeye bırakmışlardır. Post-kür işlemi için ise sırasıyla 60, 100 ve 140 ºC'de 1 saat boyunca fırında bekletmişlerdir. Daha sonra yapışmayı ölçebilmek için kayma testi gerçekleştirmek amacıyla 150x30x1 mm boyutlarında paslanmaz çelik-vinilester numunesi üretmişlerdir. Bu numuneyi üretirken ilk olarak paslanmaz çelik yüzeyi metil etil keton peroksit ile ıslattıktan sonra ve beklemeksizin üzerine 10 µm vinilester reçine uygulaması yapmışlardır. Numunelere 24 saat boyunca 800 Pa basınç uygulamışlardır. Bu şekilde yapıştırdıkları tüm numunelere farklı sıcaklıklarda post-kür işlemleri uygulamışlardır. Numunelerine uyguladıkları yaşlandırma koşulları 80 ºC sıcaklıkta ve %95 bağıl nemde 3, 7 veya 14 gün şeklindedir. Deneysel analiz olarak IR spectroskopisi, DSC ve TGA analizlerini kullanmışlardır. Yaşlandırmadan sonra, ATR-IR'deki modifikasyonlarla VE polimerinin ester gruplarına bir hidrolitik saldırısı oluştuğunu gözlemleyerek bu durumu yaşlanma periyotları boyunca polimerdeki bozunma mekanizmalarına bağlamışlardır. Bu değişikliklerin çoğunun ilk 3 günlük yaşlandırma periyotu içinde gerçekleştiğini görmüşlerdir. Bununla birlikte, polimer 3 ile 14 gün arasında değişen yaşlanma periyodları altında olduğunda, çapraz bağlanma ilerlemediği ve böylece, Tg değerinin her bir kürleşme sıcaklığı için bir limit değere ulaştığını tespit etmişlerdir. Mekanik özelliklerin genel olarak yaşlanma sıcaklığı 25 ile 140 °C arasında azaldığını; ancak, Tg'nin yakınında bir sıcaklıkta yaşlanma süresi arttıkça mekanik özellik değişikliği olmadığını gözlemişlerdir. Son olarak, yaşlanmanın, tek kaplamalı kayma bağlantilerının kayma mukavemetini azalttığını, ancak Tg'nin üzerindeki sıcaklıklarda (yani, tamamen kürlenmiş VE reçine), mekanik özelliklerde farklılık olmadığını tespit etmişlerdir [113].

You ve ark., çalışmalarında, beton yapiler için kullanılmak üzere uygun bir yapıda gerilme mukavemetinin 900 MPa varsaydıkları FRP takviye çubuklarının yapısını belirlemeyi amaçlamışlardır. Karbon ve E-cam elyaf kullanilerak, hibrit FRP çubuklar için üç farklı malzeme yapısını göz önünde bulundurmuşlardır. Vinilester ve doymamış polyester reçineleri kullanilerak, hibrit FRP çubuk numunelerini sıkıştırmak suretiyle gerginlik için test etmişlerdir. Hibridizasyonun FRP çubuklarının çekme özellikleri

üzerindeki etkisi, hibrit çubuklar için çekme testi sonuçları ile hibrit olmayan çubuklarınkilerin karşılaştırılmasıyla elde etmişlerdir. FRP çubuğunun kesiti içindeki elyafların düzeni olarak üç farklı malzeme yapısını esas almışlardır. Bu üç yapıda elyaflar sırasıyla; (a) çekirdekte yoğunlaşmış, (b) dış yüzeyde (kabuk) yerleştirilmiş ve (c) enine kesit üzerine dağıtılmıştır. Her tasarım parametresi için çapı 12,7 mm olan 10 adet örnekleme grubundan oluşan toplam 40 numune üreterek test etmişlerdir. Test programının sonuçlarında nihai gerilme değerinin, %37 cam elyafı ve %23 karbon elyafından oluşan dağınık tipteki hibrit çubuğun hibrit olmayan karbon FRP çubuğuna kıyasla %3-33 oranında arttığını görmüşlerdir. Hibrit etkisini en yüksek olarak, karbon fiberin çubuk içinde iyi dağıldığı durumda iken, gerilme dayanımını ise karbon fiberin çekirdek içinde yoğunlaştığı yerlerde tespit etmişlerdir. Hibrit etkinin, gerilme mukavemetinin ve elastik modülün artış derecesinin, karbon fiberin düzenine göre değiştiğinden dolayı, hibrid çubuklar yapilera uygulandığında, tasarım amacına uygun gerilme özelliklerini geliştirecek şekilde tasarlanmalıdır yorumunu yapmışlardır [114].

Patel ve ark., çalışmalarında epoksi, poliamid ve doymamış polyester olarak belirledikleri bu üç önemli reçine sınıfını birleştirmek ve elde ettikleri reçinenin istenen özelliklere sahip hale getirilmesi için yeni bir yaklaşım yapmışlardır. Epoksi reçineyi bisfenol A'nın diglisidil eterinden; Ortoftalik anhidrit bazlı doymamış polyester reçineyi ise maleik anhidrit ve aelyafatik diaminlerin katılma reaksiyonu ile sentezlemişlerdir. Her iki reçineyi mekanik bir karıştırıcı içeren üç boyunlu bir şişeye koyarak toplam ağırlığının %8,3 ü kadar trietilemini başlatıcı olarak ileve etmişlerdir. Karışımı sürekli karışırken 85 ºC'ye ısıtarak asit değeri 55-60 mgKOH/gm olana dek reaksiyonu devam ettirmişlerdir. İnhibitör olarak ağırlıkça %0,01 hidroquinon eklemişlerdir. Ağırlıkça %40 stiren monomeri ileve ettikten sonra sıcaklığı 80 ºC'ye düşürerek bu sıcaklıkta 1 saat boyunca karıştırmışlardır. Katalizör olarak benzoil peroksit (BPO) ve hızlandırıcı olarak Dimetil anilin (DMA) ile birlikte stiren ileve edilmiş olan doymamış polyester amid (UPEA) reçinesi ve ticari doymamış polyester reçinesi (o-ftalik anhidrid esaslı) ile karıştırmışlardır. Kompozitler, cam elyafı ile reçine oranı 60:40 olan sürekli cam elyaf matı kullanilerak hazırlamışlardır. Başlatıcı olarak %0,5 Benzoil peroksit ve promotör olarak DMA ile, stirenlenmiş UPEA'ların ticari UPR'sinin (o-ftalik anhidrit esaslı) karışımı oda sıcaklığında 5 dakika iyice karıştırıldı. Karışım daha sonra 305 mm 305 mm cam elyaf mat üzerine uygulanarak daha sonra önceden hazırlanmış olan katlar birbiri üstüne istiflenerek çelik plakalar arasına 70 psi basınç altında bastırılmış ve düz

bir plakada sıkıştırmışlardır. Elde edilen kompozitler daha sonra 20 mm x 20 mm olan nihai boyutlarında hazırlamışlardır. İlk olarak ağırlıkça %25 H_2SO_4, %25 HCl ve %25 NaOH etanol, aseton, THF ve DMF kullanarak kimyasal dayanım testi gerçekleştirmişlerdir. Testi, kompozit numuneyi her birini 100 ml olan bu reaktiflerin içine oda sıcaklığında 7 gün boyunca batırarak gerçekleştirmişlerdir. 7 gün sonra, numuneler reaktiflerden alınarak, yıkama ve kurutma işleminden sonra kalınlık ve ağırlıktaki değişim yüzdesi açısından incelenmiştir. Deneyler sonucunda kompozitlerin, etanol ve aseton gibi yaygın solventlere karşı iyi bir dirence sahip olduğu ve şu sıraya göre kompozitlerin direncinin azaldığını bulmuşlardır: Ethanol > Acetone > THF > HCl > NaOH > H_2SO_4. Mekanik test sonuçları, kompozitlerin iyi mekanik dayanıma sahip olduğunu ortaya koymuştur. Çekme mukavemeti, takviye edilmemiş ortoftalik UPR için 50 MPa olmasına karşın hemen hemen bütün kompozitler için 160-170 MPa bulmuşlardır. Eğilme dayanımı güçlendirilmiş ortoftalik UPR için 150 MPa'ya dayanırken, bükülme mukavemeti, kompozitte beklendiği gibi içinde yer alan bisamik asidin boyutuyla birlikte düştüğünü tespit etmişlerdir [115].

Dave ve ark., yapmış oldukları çalışmada ticari olarak kullanılan novalak epoksi reçine ve vinilester epoksi reçineyi kullanarak 270 g/m^2 özellikteki E-tipi cam elyaf dokuma kumaş ile ağırlıkça 60:40 elyaf-reçine oranında karışımlar hazırlamışlardır. 200 x 200 mm boyutundaki cam elyaf kumaşa uyguladıkları karışımları %1 etilendimetilekrilet ve %0,05 benzoil peroksit ekleyerek 10 kat kumaş ile ıslatma işlemini tekrarlamışlardır. 70 psi basınç uygulayarak 140 ºC'de 6 saat kürleştirdikten sonra 45 ºC-50 ºC'ye soğutmuşlardır. Karışımlara eğilme dayanımı, basınç dayanımı, darbe dayanımı, elektriksel dayanım, çekme uzaması ve sertlik deneyleri uygulamışlardır. Akrilet polyester amit (APEA)'ların vinilester karışımlarının takviye edilmemiş kür örneklerini termo gravimetrik analiz (TGA) ile analiz ettiklerinde; kürlenmiş numunenin bozulmasının yaklaşık 150 °C'de başladığını ve başlangıç ağırlığına göre kaybın yaklaşık %2-3 olduğunu ortaya koymuştur. Bu küçük ağırlık kaybını, kullanılan bileşenlerin yetersiz sertleşmesinden veya kullanılan katalizörden kaynaklanabilir şeklinde yorumlamışlardır. 300ºC'de yaklaşık %10-11 arasında bir ağırlık kaybı tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, ayrışma hızı 300 °C ile 450 °C arasında çok hızlı bir şekilde artmış ve ürünler 750 °C'nin ötesinde tamamen kaybedilmiştir. Tüm numuneleri TGA ve DSC verilerine göre ve kimyasal, mekanik ve elektriksel özellikleri ile karakterize ettiklerinde sonuçlar; kompozitlerin iyi kimyasal direnç özelliğine, iyi

mekanik ve elektriksel dayanıma sahip olduğunu göstermiştir. Tüm PEA'ların cam elyafı ile güçlendirilmiş kompozitlerini lamine ettiklerinde mükemmel direnç özellikleri ve iyi mekanik ve elektriksel özellikler gösterdiğini tespit etmişlerdir [116].

Guermazi ve ark., karbon elyaf/epoksi, cam elyaf/epoksi ve hibrit laminatlarının üretilmesi ve bunların fiziksel, termal ve mekanik karakterizasyonu üzerinde yoğunlaştıkları bir çalışma yapmışlarıdır. Kompozitleri el yatırması yöntemi ile açık kalıpta basınç uygulamaksızın üretmişlerdir. Sertleştiricisiyle %30 karıştırdıkları epoksi yapıştırıcı ve 295 g/m^2 özelliğinde R cam elyafı ve 193 g/m^2 özelliğinde karbon elyafı kullanmışlardır. Lamine ettikleri kompozitleri 160 mm x 130 mm panellerin içinde 3,9-5 mm aralıktaki kalınlıklarda sarım açıları 0º ve elyaf hacimce yüzdeleri farklı olacak şekilde hazırlamışlardır. Bitmiş laminatlar 2 saat 80 ºC'de kürleştirilmiştir. Nem absorpsiyon testinde 90 ºC'ye ayarlanmış distile su kullanmışlardır ve sonuçta cam/epoksi kompozitlerinde su miktarının, karbon/epoksi laminatına emilenden daha büyük olduğunu görmüşlerdir. TGA analizlerinde tüm numunelerin benzer TGA eğrisi eğilimleri gösterdiğini ve tüm numunelerde aynı kütle kaybı eğilimi gözlemlemişlerdir. Kompozitlerin iyi bir termal stabilite gösterdiği sıcaklık aralığının yaklaşık 280 °C ile 300 °C arasında değişen bir sıcaklığa kadar olduğunu tespit etmişlerdir. 300 °C sıcaklıktan sonra, numunelerin ağırlığı kompozit malzemelerin termal bozunmasını gösterecek şekilde aşamalı olarak azalır. Özetle tüm kompozitlerin nitrojen atmosferinde 250 °C'ye kadar termal olarak stabil olduğunu, bu değerin ötesinde, hibrid kompozit hala iyi bir termal stabilite sunarken G-E kompozitlerin ise kötü davranış sergilediğiniz görmüşlerdir. Çekme ve eğilme testlerinde tüm numunelerin (karbon/epoksi: C-E, cam/epoksi G-E ve hibrit) son kopmaya kadar doğrusal elastik davranış gösterdiğini görmüşlerdir. Elastikiyet modül değeri, G–E numunesi için en düşük ve karbon lamine için en yüksek olarak bulmuşlardır. Tüm kompozit numuneler arasında, C-E kompozitlerinin daha yüksek çekme dayanımı ve elastikiyet modülü gösterdiğini görmüşlerdir. G–E kompozitleri daha düşük değerleri gösterirken, hibrit kompozitler aradaki değerleri göstermiştir. Bu sonuçları, C-E kompozitlerinde epoksi reçinenin karbon fiberlere iyi yapışması ve G-E kompozitler için cam elyafları ve epoksi reçinesi arasındaki zayıf ara yüzey yapışmasına atfetmişlerdir. Ek olarak, sadece ilk seriye (1A, 1B, 1C ve 1D numunelere) odaklanırken, düşük elyaf içeriğine sahip olan (%48 aralığında) 1B numunesinin küçük elastikiyet modülü (yaklaşık 26 GPa) gösterdiğini not etmişlerdir. Aksine, daha yüksek elyaf içeriğine (%61) sahip olan örnek

daha yüksek modül (41 GPa) sergilemiştir. Hibrit kompozit ile ilgili bu sonuç açıktır (karışımlar yasasından): elyaf içeriğindeki bir artış kompozit malzemenin elastik modülünü iyileştirir. Kayma mesafesinin veya test süresinin bir fonksiyonu olarak doğrusal aşınma oranı değişimi gözlememişlerdir. C-E örneklerinin, 90 °C'de 3 ay yaşlandırmadan sonra hasara karşı daha az duyarlı olduğunu, hibrit örneklerin genellikle orta düzeyde bir hasar oluşturduğunu ve bununla birlikte, G-E numunelerinin ise daha belirgin bir bozulma sergileyerek başlangıçtaki gerilme dayanımlarının ve elastik modüllerinin sırasıyla yaklaşık %39 ve %36'sını kaybettiğini tespit etmişlerdir. Bozulma evresinden sonra eğilme dayanımı ve eğilme modülündeki kayıp ise sırasıyla yaklaşık %27 ve %30 olarak bulmuşlardır. Aşınma bulgularında, cam elyafların, epoksi matrisindeki karbon elyaflardan daha kolayca çıkarılırken, karbon fiberler daha az aşınma gösterdiğini; yani cam elyaflar ve epoksi arasındaki yapışmaya kıyasla karbon elyafları ve epoksi arasındaki daha iyi ara yüzey yapışmasını sağladığını tespit etmişlerdir [117].

Gümilcine ve ark., yapmış oldukları çalışmada izoftalik reçine matris içerisinde E-camı ve bazalt elyafı kullanarak mekanik performanslarında kıyaslama yapmışlardır. El yatırması metodu ile sürekli elyafları aynı yönde uygulayarak reçine ile ıslatılmak suretiyle plakalar üretmişlerdir. Kompozit plakaların kürleşme için numuneleri oda sıcaklığında 6 saat süre ile bekletilerek; post-kür için ise 70 °C'de 1 saat, akabinde 90 °C'de 1 saat ve son olarak 120 °C'de 1 saat bekleterek gerçekleştirmişlerdir. Çekme mukavemeti deney sonuçlarına göre eşit fiber hacminde (örneğin %5 Vf'de) bazalt elyaf takviyeli kompozit numuneler daha kalın çaplı olan diğer bazalt elyaf takviyeli numunelerden %41,7 , cam elyaf takviyeli numunelerden %41,8 ile %113,2 daha fazla bulmuşlardır. Elastikiyet modülü değerlerini kıyasladıklarında ise bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin cam elyaf takviyelilerden daha yüksek elastikiyet modülüne sahip olduğu görmüşlerdir. Eşit elyaf hacminde (örneğin %5 Vf'de) bazalt elyaf takviyeli takviyeli numuneler cam elyaf takviyelilerden %8,6 ile %100,4 daha yüksek çekme modülüne sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Eğme deneyi sonunda çekme deneyine benzer mekanik davranışlar gözlemişlerdir. Tüm sonuçları değerlendirdiklerinde, elyaf çeşidine bağlı olarak değişmekle birlikte artan elyaf hacim oranı ile mukavemetin de arttığı, bazalt elyafların kompozit malzemeye sağladığı mekanik mukavemetin, E-camı elyafına göre çok daha fazla olduğunu, çekme, eğme ve darbe deneylerinde bazalt fiber takviyeli

kompozit numunelerin, cam fiber takviyeli numunelerden daha yüksek mekanik performans gösterdiğini tespit etmişlerdir [118].

Benmokrane ve ark., vinil-ester, izoftalik polyester veya epoksi reçineleri ile yapılmış cam elyaf takviyeli polimer çubuklarının fiziksel ve mekanik özellikleri ve uzun dönem performansını değerlendirmek amacıyla yapmış oldukları çalışmada cam/polyester, cam/vinilester ve cam/epoksi FRP çubukları, polyester, vinilester veya epoksi reçineleri ile ıslatılmış sürekli cam elyafları kullanmak suretiyle ile pultrusion yöntemi ile üretmişlerdir. Referans GFRP çubukları için fiziksel özellikler olarak; (1) elyaf içeriği, (2) nem emme, (3) sertleşme oranı ve (4) camsı geçiş sıcaklığı parametrelerini belirlemişlerdir. Cam elyaf içeriği 550 °C'de inert atmosferde ısıtıldığında oluşan kütle kaybına göre, su emme özelliğini ise numunelerin 50 °C'de 3 hafta tutulması ile oluşan kütle farkından hesaplamışlardır. Numunelerin polimerizasyon entalpisini DSC ile ölçerek ve matristeki reçinenin ağırlık yüzdesi dikkate alınarak saf reçinenin polimerizasyon entalpisi ile karşileştırmışlardır. Deney sonuçlarında epoksi ve vinil-ester GFRP çubuklarının daha yüksek fiber reçine bağı, eğilme mukavemeti, eğilme elastikiyet modülü ve elyaf matris ara yüzü tarafından yönetilen tabakalar arası-kayma dayanımı sergilediği tespit edilmiştir. Buna ek olarak, daha düşük nem alımı gösterdiğini görmüşlerdir. Hem polyester hem de epoksi GFRP çubuklarının, 5000 saatlik daldırma işleminden sonra (sırasıyla %25 ve %23) aynı eğilme mukavemetinde düşüşe sahipken, vinil-ester GFRP çubuklarının %17 lik düşük bir azalma sağlamış olduğunu görmüşlerdir. Bu gözlemler, GFRP elyafları ile polyester arasındaki bağlanmanın cam elyafları ile vinil-ester ya da epoksi reçinesi arasındakinden daha düşük olduğunu doğrulamıştır. Şartlandırılmamış polyester GFRP çubukları daha düşük enine kayma dayanımı, eğilme dayanımı, tabakalar arası kayma dayanımı ve en zayıf ara yüzü sergilemiştir. Polyester GFRP çubuklarının çapraz-mukavemet direnci, hızlandırılmış 5000 saat yaşlanmadan sonra %22,5 azalma şeklinde önemli ölçüde etkilenirken, epoksi ve vinil-ester GFRP barları, 5000 saatten sonra hızlandırılmış yaşlanmadan sırasıyla %11 ve %15,9 kadar hafifçe azalma şeklinde etkilenmiştir. Polyester GFRP çubuklarının eğilme mukavemeti, 5000 saat sonra hızlandırılmış yaşlanmadan %25 gibi önemli bir azalma olarak etkilenirken, vinil-ester ve epoksi GFRP çubukları, 5000 saat sonra hızlandırılmış yaşlanmadan sırasıyla %17 ve %23 olarak etkilendiğini görmüşlerdir. Polyester GFRP çubuklarının kayma mukavemeti, 5000 saat hızlandırılmış yaşlanmadan sonra %21 azalma oranında etkilenirken,

vinilester ve epoksi GFRP barları, her biri 5000 saat sonra hızlandırılmış yaşlanmadan %13 azalma şeklinde hafifçe etkilenerek elyaf reçine ara yüzü şartlandırma işleminin meydana gelen bozulmayı kontrol etmede önemli bir rol oynadığı sonucuna varmışlardır. Polyester GFRP çubuklarının, kürlenme sonrası şartlandırmadan sonra Tg'de yaklaşık 5 °C'lik bir artış gösterdiğini bununla birlikte, vinil-ester ve epoksi GFRP çubuklarının, şartlandırmadan sonra Tg'de bir düşüş olduğunu gözlemişlerdir. Polyester GFRP çubukları, referans numuneye kıyasla şartlandırmadan sonra vinil-ester ve epoksi GFRP çubuklarından %18 daha fazla su emmiş olduğunu tespit etmişlerdir [105].

Fragassa ve ark., çalışmalarında vinilester reçinesi kullanarak keten ve bazalt elyaflarının ve bunların karışımlarının mekanik ve darbe özelliklerinin analizini yapmak için takviyeli termoset kompozitleri, el yatırması ve reçine infüzyonu ile üretmişlerdir. Keten elyafının alan ağırlığı 300 g/m^2 olan 0/90 oryantasyondaki kumaş şeklinde, bazalt elyafının ise alan ağırlığı 350 g/m^2 olan 0/90 oryantasyondaki kumaş biçiminde kullanmışlardır. Matris olarak halihazırda hızlandırılmış ve tiksotropik olarak vinilester ile bisfenolik epoksi arasında bir karışım yoluyla elde edilen vinilester reçine kullanmışlardır. Kompozit laminatları el yatırması yöntemi ile iç ve dışta ikişer kat bazalt elyafı, ortada dört kat keten elyafı olacak şekilde sekiz adet kumaş takviyesi kullanilerak üretmişlerdir. Kuru kumaş katmanlarını elle bir laminat istif oluşturmak üzere bir düzlem destek üzerine istifledikten sonra reçineyi bu kuru katlara uygulanmak suretiyle basınç altında infüzyon yoluyla ileve etmişlerdir. Uygulamada, laminatlara çevre koşullarında ilk 24 saat sertleştirme uygulanmış, daha sonra 100 °C sıcaklıkta 6 barlık bir basınç altında 3 saatlik bir kürleşme uygulamışlardır. Darbe testinde elyaf laminatlarında maksimum 40 J enerji enerjisi uygulamışlardır. Yapılan çekme ve eğilme testlerinde hibrit laminatların, bazalt ve keten elyafı laminatları arasında ara değerlerde olduğunu tespit etmişlerdir. Darbe deneylerinde ise keten elyafı kompozitlerinde düşük enerjilerde bile çarpma esnasında kumaşta geniş bir yırtılma olduğunu, bazalt elyaf laminatlar söz konusu olduğunda, kumaş çarpma noktasının ötesinde kırılma eğilimi göstermediğini, çoğu hasarda bunun yerine, çarpma bölgesinin çevresinde bir girinti veya çıkıntı olarak reçine aşınmasının şeklini fark etmişledir. Sonuçları değerlendirdiklerinde hibridizasyonun, keten elyafı kompozitlerinin darbe performansını, ağırlıkta aşırı bir artış olmadan önemli ölçüde arttırdığını, keten

elyaflarının araya koyulması ile laminatların dokuma konfigürasyonuna ve kusurlarını ve delaminasyona eğilimli olmasına neden olduğunu görmüşlerdir [119].

Reddy ve ark., çalışmalarında kenevir, ananas yaprağı ve cam elyafını çeşitli hacim fraksiyonlarında kullanarak epoksi reçine matrisi ile ıslatmak suretiyle kompozitler hazırlayarak bunların mekanik özelliklerini araştırmak için çekme ve eğilme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Genel amaçlı epoksi reçine, metil etil keton peroksit ve kobalt naftenat ile kenevir, ananas yaprağı ve cam elyafının hacimce 1:1:1 oranında kullanarak el yatırması yöntemi ile polimer hibrit kompozitler hazırlamışlardır. Sertleşme sırasında kalıp üzerine 0,05 MPa'lık bir basınç uygulamış ve kompozit numuneler 24 saat boyunca sertleştirdikten sonra kalıptan çıkardıkları numuneleri 2 saat boyunca 70 °C'de kürleştirmişlerdir. Numunleri beş farklı yüzde hacimdeki kenevir, ananas yaprağı ve cam elyafları ile hazırlamışlardır. Deney sonuçlarında epoksi matrisindeki elyaf içeriği arttıkça epoksi reçinenin uygulanan gerilimi kenevir, ananas yaprağı elyafı ve cam elyafı üzerine iletmesi ve dağıtması sayesinde gerilme mukavemetinin de arttığını ve kompozitlerin maksimum elyaf içeriğindeki (hacimce %42 elyaf) gerilme dayanımındaki artış yüzdesini 71.66 MPa olarak bulmuşlardır. Kompozitlerin çekme modülü de, elyafın hacim fraksiyonu arttıkça arttığını, maksimum elyaf içeriğindeki eğilme mukavemetini ise yaklaşık 239,37 MPa olarak tespit etmişlerdir. Kenevir, ananas yaprağı elyafı ve cam elyafı epoksi kompozitlerinin ağırlıklarının hafif olması ile birlikte, daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu görmüşlerdir [120].

Worzakowska, yapmış olduğu çalışmasında yeni epoksi-disiklopentadien sonlu polyesterler-stiren kopolimerlerinin termal ve viskoelastik özelliklerini incelemişlerdir. Polyesterleri stiren içinde çözmüş ve %10, %20, %40, %60 ve %80 monovinil monomer içeren reçineleri hazırlamışlardır. Kürleştirirken stokiyometrik miktarda heksahidroftalik anhidrid ve %1 benzoil peroksit karışımı uygulamışlardır. Daha sonra karışımları, 60 °C ile 120 °C sıcaklık aralığında şartlandırarak yaklaşık 160 °C ile 180 °C sıcaklıktan sonra sertleştirmişlerdir. Yaptıkları analizlerde kopolimerlerin termal ve viskoelastik özelliklerinin, polyesterin ve ayrıca stiren içeriğinin kimyasal yapısına bağlı olduğunu görmüşlerdir. Etilen glikol bazlı kopolimerlerin genel olarak dietilen veya trietilen glikol bazlı olanlardan daha sert ve termal olarak daha kararlı olduğunu tespit etmişlerdir. Kopolimerlerde stiren içeriğindeki artışın, muhtemelen plastikleştirmeden dolayı daha az yoğun çapraz bağlı ağların elde edilmesine neden olduğunu ve monovinil monomerin etkisi ile ve polimer yapilerdaki aromatik halka

içeriğinin artması nedeniyle termal olarak daha kararlı olduğunu görmüşlerdir. Bu çalışmaları ile yeni epoksi-disiklopentadiene sonlu polyesterlerin, stiren kopolimerlerinin hazırlanmasında bileşen olarak başarıyla uygulanabileceğini ve özelliklerinden dolayı pratik uygulamalar için umut vaat eden malzemeler olduğunu doğrulamışlardır [121].

Laoubi ve ark., orta ve yüksek sıcaklıklara maruz kalan E-cam elyafı doymamış polyester kompozitlerin davranışını incelemek için yaptıkları çalışmalarında elde ettikleri sonuçlarda reçinenin kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinin kompozitin sıcaklığın yükselmesiyle değiştiğini görmüşlerdir. Termogravimetrik analizlerde ise kompozitin termal bozulmasının birincisi 130 ºC ile 200 ºC ve ikincisi 250 ºC ile 440ºC arasında olacak şekilde iki aşamada gerçekleştiğini bulmuşlardır. Çalışmalarında kullandıkları malzemeler önceden hızlandırılmış ortoftalik polyester reçine beyaz pigmentli izoftalik polyester reçine, ve cam/polyester lamine kompozittir. Sertleşme reaksiyonunu başlatmak için ağırlıkça %2 metil etil keton peroksit çözeltisi kullanarak el yatırması metodu ile sırasıyla [mat300/mat450/2 [mat600]/roving500/mat300] şeklinde elyafları dizmişlerdir. Reçine numunelerini ise döküm yöntemiyle hazırlayarak oda sıcaklığında 24 saat, ardından 40 °C'de 16 saat kürleştirmişlerdir. FT-IR analizinde orta sıcaklıklarda (100 °C), reçinenin herhangi bir termal bozulmasını gözlememişlerdir. Bu sıcaklık için, SEM ile yapilen gözlemler, bileşikte herhangi bir bozulma ortaya koymuştur. 200 °C'deki, FT-IR sonuçlarına göre su moleküllerinin buharlaşmasını ve bunun kurutmanın malzemedeki suyu ortadan kaldırması ve su-makromolekül bağlantileri yerine iki makromolekül arasındaki ikincil bağlantileri arttırması ile açıklamışlardır. Ek olarak, SEM analizlerinde, kompozit içerisinde bir elyaf-matris faz kırılması olduğunu ve mekanik mukavemette bir azalmayla sonuçlandığını gözlemlemişlerdir. 280 °C' de, uzun vadede reçinenin zayıflamasına neden olabilecek şekilde reçinenin termal bozunması ile yaklaşık %43'lük bir kütle kaybı görmüşlerdir. Mikroskopik gözlemler, reçinede çatlak ortaya çıkartmış ve bunu kompozitteki bir delaminasyonla ilişkilendirmişlerdir [122].

Arrieta ve ark., 120 °C ile 160 °C arasındaki sıcaklıklarda ve 0.02 ile 2.0 MPa arasında değişen oksijen basınçlarında vinilester ve doymamış polyesterin termal oksidatif yaşlanmasını çalışmıştır. Doymamış polyesteri ağırlıkça %28 stiren içeren 1,2 propandiol fumarik asit karışımının yoğunlaştırılmasından elde etmişlerdir. Vinilesteri ise ağırlıkça %33 oranında stiren içeren 1: 3 bisfenol A vinilester ve novolac'tan elde

etmişlerdir. Başlatıcı olarak organik peroksit ve katalizör olarak bir kobalt (II) karboksilet ile kürleştirmek suretiyle 70 mm ortalama kalınlıkta filmler ve 0.2-5 mm kalınlığında plakalar elde etmişlerdir. Hem doymamış polyesteri hem de vinilesteri oda sıcaklığında 1 saat jelleşme ve ardından 80 °C'de 12 saat kürleştirmişlerdir. Dolgulu ve dolgusuz filmlerin ve stiren ile kürlenmiş vinilester veya doymamış polyesterlerden yapılan termoset reçinelerin plakalarının ısıl oksidasyonunu çeşitli sıcaklıklarda ve oksijen basınçlarında incelemişlerdir. FT-IR ölçümlerinde, ester grubunun bir pozisyonunda CH_2 oksidasyonundan gelen bir anhidrit olduğu sonucuna varilen bir karbonil ürünlerinin birikimini gözlemişlerdir. Karbonil oluşumu için kinetik eğriler, vinilesterin doymamış polyesterden daha fazla oksitlenebildiğini göstermiş olup; bu durumu optik mikroskopi ve gravimetrik verilerden saptanan oksitlenmiş tabakaların kalınlığının karşılaştırılmasıyla teyit etmişlerdir. Bununla birlikte, uçucu bileşiklerin veriminin, yükseltgenebilir bölgeler arasındaki mesafeyle ilgili olarak tartışilen UP'den daha büyük olduğunu gözlemişlerdir. Vinilesterin doymamış polyesterden daha az stabil olduğu ancak nötron koruma performanslarını UP'den daha uzun tutacağı sonucuna varmışlardır [123].

Atiqah ve ark., %70 oranında doymamış polyester reçine ve %30 hacim oranlarında, keçe kumaş, kırpılmış kenaf ve cam elyafını birleştirerek hibrit kompozitler üretmişlerdir. Kullandıkları kenaf elyafını, ağartma yöntemi ile 3 saat %6 sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ile işlemişlerdir. Cam elyafını E camı tipinde ve 15x15x0,15 mm ebatlarında keçe kumaş şeklinde kullanmışlardır. doymamış polyester reçinesi, 100:14 oranında hızlandırıcıyla karıştırılmıştır. Kalıplama yaptıktan sonra, 25 °C de, 0,5 bar basınç altında, 30 dakika süreyle, saç kalıplama bileşiği (Sheet Moulding Compound: SMC) makinası içerisinde kürleştirme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. En yüksek eğilme, çekme ve darbe dayanımı, S3 karışımında doymamış polyester reçine (hacimce %70) + işlenmemiş Kenaf (hacimce %15) + kırpılmış keçe E-cam elyafları (hacimce %15) hibrit kompozitinde elde edilmişlerdir. Bu karışımdaki çekme dayanımını 39,28 MPa, eğilme dayanımını 453,22 MPa ve izod darbe dayanımını 146,04 MPa olarak belirlemişlerdir [124].

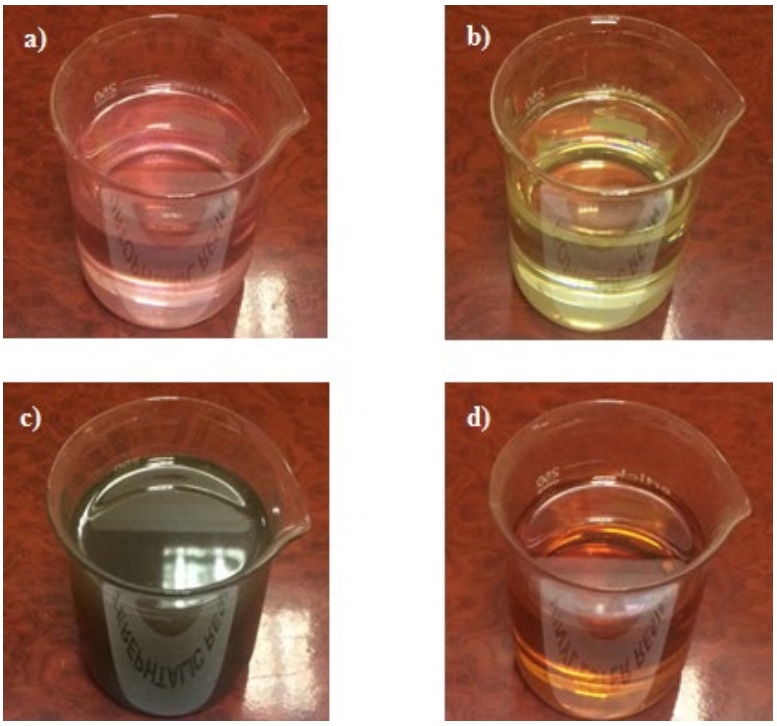
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. MATERYAL

Çalışma kapsamındaki hibrit malzeme üretiminde bağlayıcı polimer matris olarak ortoftalik, izoftalik, tereftalik, bisfenol-A epoksi bazlı vinilester reçineler, takviye malzemesi olarak ise kırpılmış E tipi cam elyafı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan hammaddelerle ilgili ayrıntılı bilgiler bu bölümde sunulmuştur.

3.1.1. Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Matris Malzemeleri

Bu çalışmada bağlayıcı polimer matris olarak Poliya Polyester San. ve Tic. Ltd. Şti.'den temin edilen; ortoftalik polyester reçine/POLIPOL 3562-SR, izoftalik polyester reçine/POLIPOL 3873 SR, tereftalik polyester reçine/POLIPOL 3570-SR ve bisfenol-A bazlı epoksi vinilester reçine/POLIVES 701 kullanılmıştır. Kullanılmış olan bu matris reçineler Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan ham polyester reçine türlerinin bazı özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir [125].

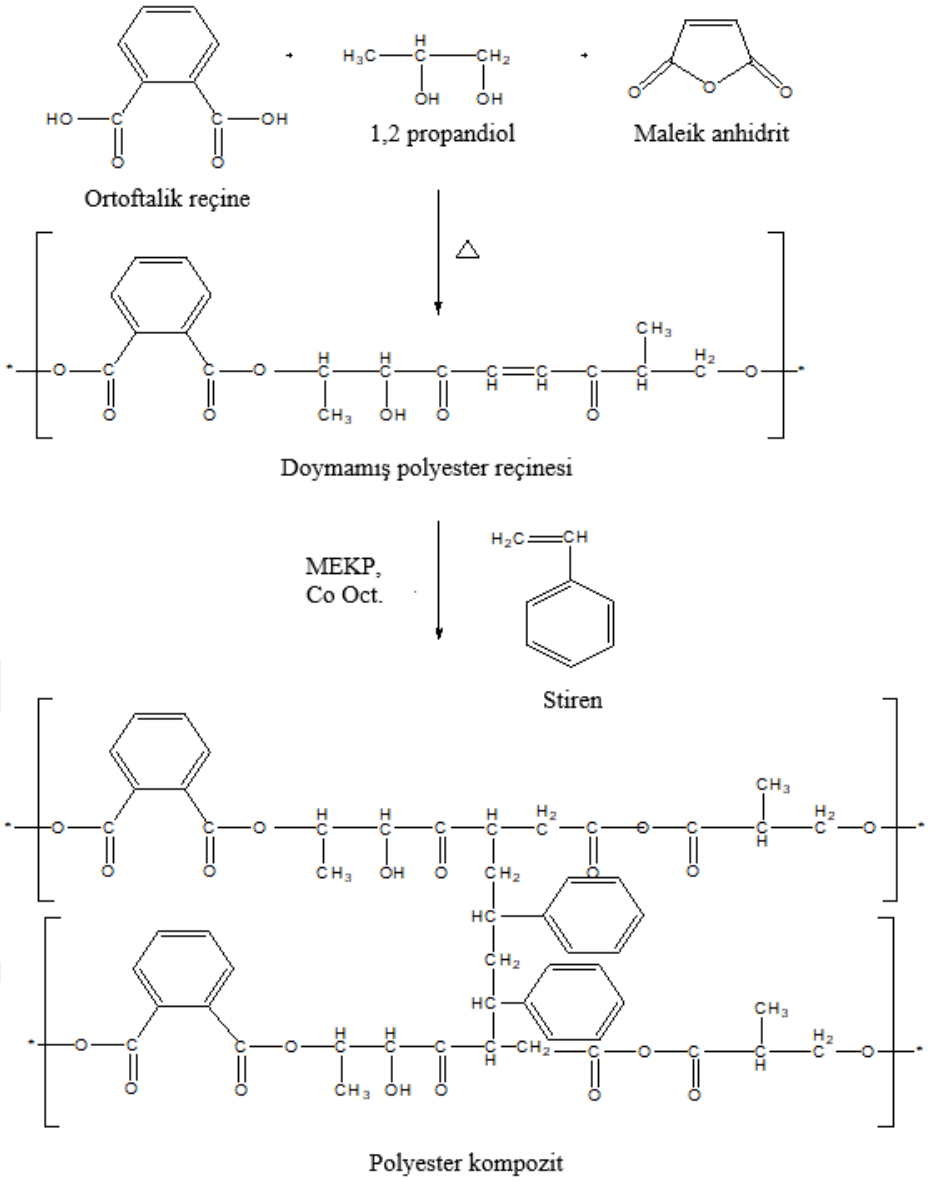


Şekil 3.1. Kullanılan reçineler a) Ortoftalik b) İzoftalik c) Tereftalik d) Vinilester.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan reçine türlerinin fiziksel ve mekanik özellikleri.

Özellik	Test Metodu	Birim	Ortoftalik Polyester Reçine	İzoftalik Polyester Reçine	Tereftalik Polyester Reçine	Epoksi bazlı Vinylester Reçine
Yoğunluk	ISO 1675	g/cm^3	1,12	1,11	1,12	1,044
Asit Değeri	ISO 2114	mg KOH/g	20	23	14	9
Viskozite[1] Brookfield®	ISO 2555	cp	250	275	250	400
Jel Süresi [2]	ISO 2535	dk	15	15	15	22
Monomer Oranı	-	%	43	42	42	42
Parlama Noktası	Abel-Pernsky	°C	34	33	34	34
Heat Deflection Temperature (HDT)	ISO 0075-B	°C	75	95	86	100
Su Absorbsiyonu	ISO 0062	%	0,0018	0,0018	0,0018	0,0015
Barkol Sertliği (Barcol 934-1)	ASTM-D 2583	Barcol	42	45	40	35
Toplam Hacimsel Çekme	ISO 3521	%	8,0	8,4	8,1	7,7
Eğilme Dayanımı	ISO 178	MPa	125	140	129	160
Eğilme Modülü	ISO 178	MPa	3800	4000	3800	4360
Kopmadaki Uzama	ISO 178	%	4,00	6,00	4,65	6,90
Çekme Dayanımı	ISO 527	MPa	74	77	71	80
Çekme Modülü	ISO 527	MPa	3550	3000	3420	3300
Kopmadaki Uzama	ISO 527	%	3,15	4,40	3,20	5,50
Izod Darbe Dayanımı	ISO 180	kj/m^2	10	14	12	17

Reaksiyonlarda kullanılan reçine türleri ile başlatıcı ve hızlandırıcının kimyasal yapilerına ait görseller Şekil 3.2 'de verilmiştir [55].



Şekil 3.2. Kompozit üretiminde kullanılan kimyasalların genel yapıları.

3.1.2. Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Takviye Malzemesi

Takviye malzemesi olarak, CAM ELYAF Firmasından temin edilen; E tipi cam elyafı/KCR6H-2400-E malzemesi kullanılmıştır. Şekil 3.3'te, kullanılan takviye malzemesi gösterilmiştir. Yaklaşık 5 cm boyunda kırpılmış olarak kullanılan E tipi cam elyafına ait fiziksel özellikler Çizelge 3.2'de verilmiştir.

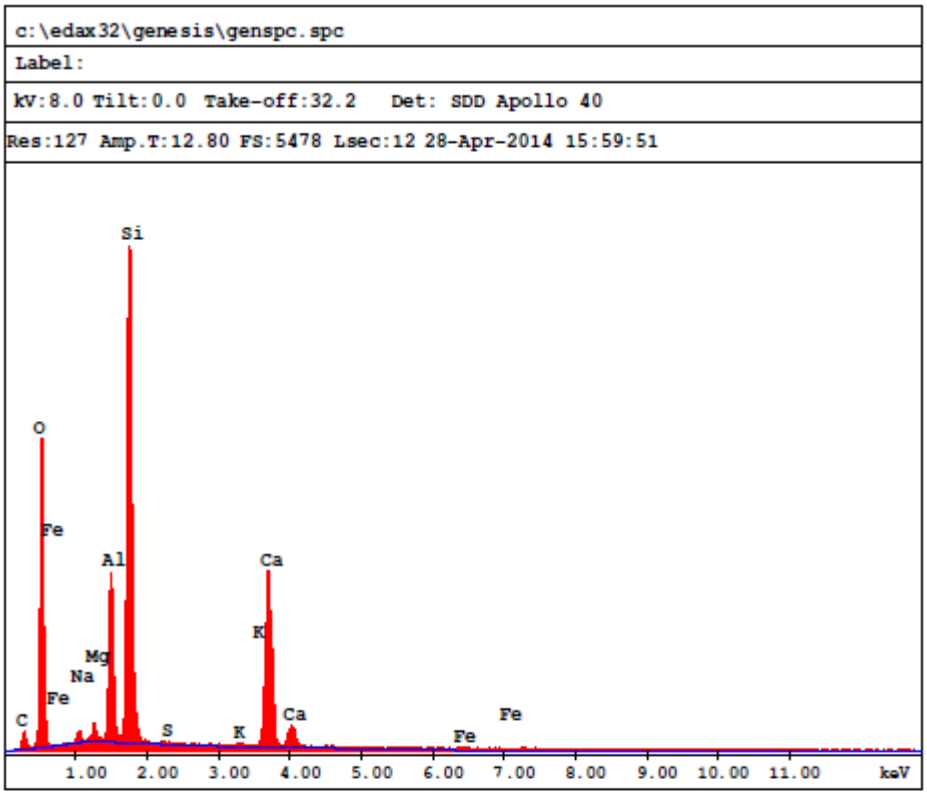


Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan E tipi cam elyafı.

Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan kırpılmış elyaf takviyesinin fiziksel özellikleri.

Özellik	**Test Metodu**	**Takviye malzemesi**
		Cam elyafı
Elyaf çapı (micron)	ISO 1887	11-13
Tex Sayısı (Elyaf ağırlığı (g/km))	ISO 1889	2280-2520
Nem miktarı (%)	ISO 3344	Max. 0,1
Kizdırma Kaybı (%)	ISO 1887	0,6-0,9
Özgül Ağırlık	-	2,60

Cam elyaflarının kimyasal bileşenlerinin analizi EDX cihazı ile alınmış olup sonuçlar Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



EDAX ZAF Quantification (Standardless)
Element Normalized
SEC Table : Default

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	1.11	2.52	0.0038	1.1006	0.3133	1.0005
O K	18.31	31.19	0.0687	1.0726	0.3500	1.0002
FeL	0.00	0.00	0.0000	0.8689	0.5570	1.0005
NaK	0.42	0.50	0.0032	0.9981	0.7595	1.0024
MgK	0.58	0.66	0.0051	1.0165	0.8524	1.0053
AlK	7.67	7.75	0.0692	0.9816	0.9114	1.0083
SiK	29.10	28.24	0.2720	1.0061	0.9272	1.0021
S K	0.11	0.09	0.0010	0.9901	0.9265	1.0063
K K	0.46	0.32	0.0044	0.9408	0.9805	1.0414
CaK	42.23	28.72	0.3997	0.9582	0.9878	1.0000
Total	100.00	100.00				

Şekil 3.4. Cam elyaflarının kimyasal bileşenlerinin analizi.

Cam elyafının yapısında Si, Ca, Na, Fe, Mg, Al, K, O ve C gibi elementler ile birlikte bunların bileşiklerini içerdiği gözlenmiştir. Cam elyafı içerisinde en fazla olan element silis olarak tespit edilmiştir.

3.1.3 Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Kürleştirici Kimyasallar

Çalışmada kullanılan reçinelerin polimerizasyonun oluşabilmesi için başlatıcı (kürleştirici) olarak Akpa Firmasından temin edilen, metil etil keton peroksit (Akperoks

A60), hızlandırıcı (katalizör) olarak da çözücüsü stiren olan %1 konsantrasyona sahip Co çözeltisi (Akkobalt %1) kullanılmıştır. Yapilen analizlerde kullanilecak olan numunelerin üretiminde; numunede kullanılan toplam reçine miktarının ağırlıkça %1 i oranında Co çözeltisi ve ağırlıkça %1,5 oranında metil etil keton peroksit kullanılmıştır. Kullanılan bu kimyasallara ait fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Çalışmada kullanılan kobalt katalizörün özellikleri.

Özellik	**Birim**	**Değer**
Yoğunluk (@ 25 °C)	g/cm^3	0,92
Viskozite (@ 20 °C)	MPa.s	7
Görünüm	-	Menekşe Mavi Sıvı
Seyreltici	-	Stiren Monomeri
Diğer Çözücüler	-	Aromatik Solventler ve Saf Ftalatlar
pH	-	nötr
Kobalt İçeriği	%	1
Alevlenme noktası	°C	34

Çizelge 3.4. Çalışmada kullanılan metil etil keton peroksit başlatıcının özellikleri.

Özellik	**Birim**	**Değer**
Yoğunluk (@ 25 °C)	g/cm^3	1,17
Viskozite (@ 20 °C)	MPa.s	25
Görünüm	-	Renksiz Sıvı
Seyreltici	-	DMP
Aktif Oksijen İçeriği	%	9,8-10
Peroksit İçeriği	%	34-36
Bozunma sıcaklığı	°C	60

3.2. YÖNTEM

Yapılan deneysel çalışmalar 3 adımda gerçekleştirilmiştir.

İlk aşamada, ortoftalik, izoftalik ve tereftalik polyester reçinelerin her birinin epoksi bazlı vinilester reçine ile iki tabakalı plakalarının ara yüzey uyumu araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda reçinelerin her biri ile epoksi bazlı vinilester reçineden oluşan iki tabakalı plakalar üretilmiştir. Üretilen bu plakaların ara yüzeyinin SEM görüntüleri incelenmiştir.

İkinci aşamada, bu dört farklı tipteki reçinenin ikili ve üçlü hibrit karışımları 10 farklı kombinasyonda hazırlanarak bireysel özellikleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu aşamada öncelikle hibrit karışımlarının fiziksel ve kimyasal testleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra üretilen tüm hibrit karışımların mekanik testleri gerçekleştirilerek bu numunelerin kimyasal ve termal analizleri yapılmıştır.

Son aşamada yine aynı amaç doğrultusunda hazırlanan reçine karışımlarına ağırlıkça %5, %10 ve %20 oranlarında E tipi cam elyafı ile takviye edilmiş hibrit kompozitler üretilmiştir. Üretilen bu hibrit cam elyafı takviyeli kompozit malzemeler üzerinde mekanik testler gerçekleştirilmiştir.

Uygulanan deneysel çalışmaların detayları aşağıda verilmiştir.

3.2.1. İki Tabakalı Reçine Plakalarının Hazırlanması

Çalışmada kullanılan ortoftalik, izoftalik ve tereftalik polyester reçinelerin her birinin ayrı ayrı epoksi bazlı vinilester reçine ile olan iki tabakalı test grupları için plakalar üretilmiştir. Daha sonra bu numunelerin ara yapışma yüzeyleri üzerinde SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Ara yüzeyleri üzerinde SEM analizi gerçekleştirilen reçine karışımları sırasıyla aşağıdaki gibidir:

i. ortoftalik polyester reçine ile epoksi bazlı vinilester reçine,

ii. izoftalik polyester reçine ile epoksi bazlı vinilester reçine,

iii. tereftalik polyester reçine ile epoksi bazlı vinilester reçine olarak belirlenmiştir.

Polimerleşme reaksiyonu, oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. İki tip reçineden üretilen plakalar; her bir reçine tabakasının kalınlığı 2 mm, toplamda 4 mm kalınlıkta olacak şekilde ve her bir reçine tipinden 275 g, toplamda 550 g reçine kullanilerak üretilmiştir.

Başlatıcı peroksit ve hızlandırıcı kobalt oranları tüm karışımlar için aynı şekilde kullanılmıştır. Bunlar; kullanılan toplam reçine miktarının ağırlıkça %1'i oranında hızlandırıcı Co çözeltisi ve ağırlıkça %1,5'i oranında başlatıcı metil etil keton peroksit çözeltisidir. Reçine plakaları camdan kalıplar kullanilerak üretilmiştir. Reçinelerin cam kalıplara yapışmaması için aelyafatik hidrokarbon solventli balmumu ve mineral vaks bazlı sprey vaks kullanılmıştır. Sprey vaks kalıp üzerine ince bir film elde edecek biçimde püskürtülerek hemen temiz kuru penye bir bezle silinip parlatılmıştır. Parlatılmış kalıp 15-20 dakika vaks filminin tamamen kuruması için bekletildikten sonra son kez temiz bir bezle silinip parlatilerak polyester döküm uygulaması yapılmıştır.

İlk olarak doymamış polyester reçinesine ve epoksi bazlı vinilester reçinesine ayrı beherlerde hızlandırıcı kobalt ileve edilerek 2-3 dk cam bir babet ile manuel olarak karıştırılmıştır. Daha sonra seçilen doymamış polyester reçine üzerine başlatıcı peroksit ileve edilerek 1 dk kadar karıştırıldıktan sonra bu karışım cam plaka üzerine dökülmüştür. Plakaya ilk dökülen doymamış polyester reçinesi jelleşme noktasına ulaştığı sırada epoksi bazlı vinilester reçineye başlatıcı peroksit karıştırılmıştır. Peroksit ileve edilen epoksi bazlı vinilester reçine beklemeksizin jelleşmeye başlayan doymamış polyester reçine plakası üzerine dökülerek sertleşmesi beklenmiştir.

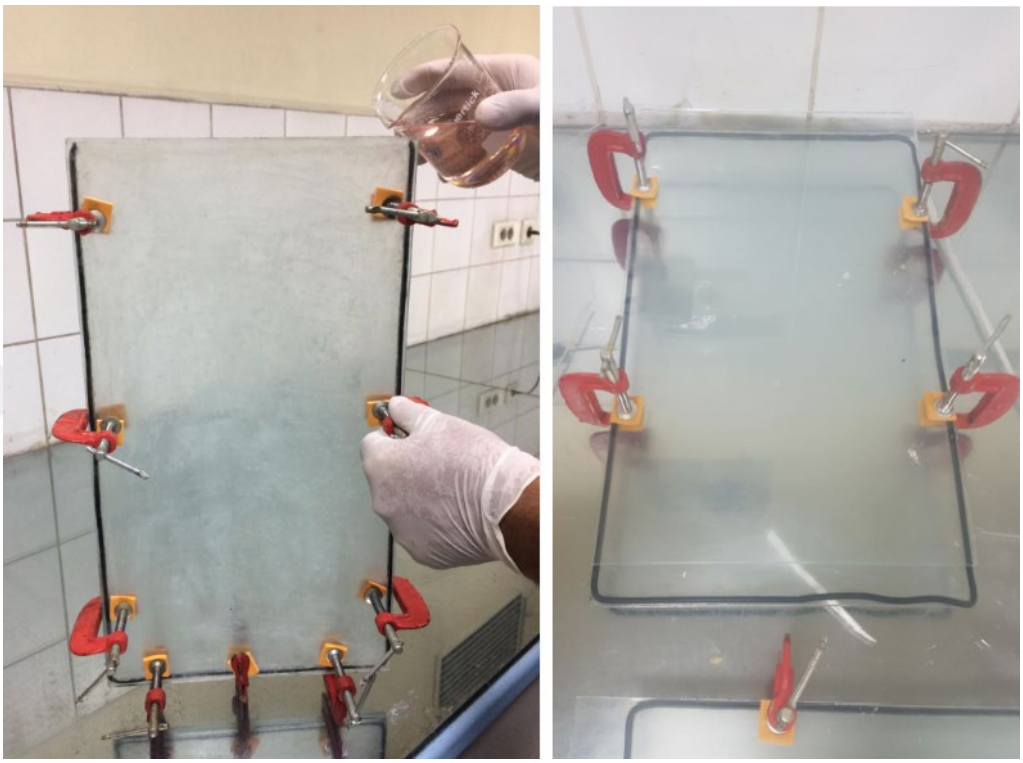
Sertleşen plakalar kalıptan çıkartilerak etüvde 50 ºC de 1 saat , 80 ºC de 1 saat ve son olarak 110 ºC de 1 saat olmak üzere toplamda 3 saat kürleşme işlemine tabi tutulmuştur. Plakalar etüvde kendi halinde soğumaya bırakılmıştır. Bu şekilde ortoftalik, izoftalik ve tereftalik reçinelerin her biri epoksi bazlı vinilester reçine ve birbirleri ile kombine edilerek toplam 3 adet numune üretilmiştir. Üretilen bu plakaların ara yüzeyinin SEM görüntüleri incelenmiştir.

3.2.2. Hibrit Reçine Karışımlarının Hazırlanması

Çalışmanın ikinci aşamasında kullanılan doymamış polyester ve bisfenol A epoksi bazlı vinilester reçinelerin tamamen birbirine karıştırılmak suretiyle farklı kombinasyondaki ikili ve üçlü hibrit karışımları hazırlanarak bireysel reçine özellikleri geliştirilmeye çalışılmıştır.

İlk olarak mekanik testleri uluslararası standartlara uygun olarak tasarlanan 4 mm kalınlığındaki cam kalıplara ince bir film elde edecek biçimde sprey vaks püskürtülerek

hemen temiz kuru bir bezle silinip parlatılmış olan kalıp 15-20 dakika vaks filminin tamamen kuruması için bekletildikten sonra son kez temiz bir bezle silinip parlatilerak üzerine numune reçine döküm uygulaması yapılmıştır. Reçine karışımlarının cam levha kalıplara dökülme ve sertleştirme işlemi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Reçine karışımlarının cam kalıplarda dökülme ve sertleştirme işlemi.

İlk olarak karışımı oluşturacak olan doymamış polyester reçinelerden her birinden eşit miktarlarda tartilerak, toplamda 550 g karışım olacak şekilde cam bir beher içerisinde 3-5 dk homojen olarak karıştırılmıştır. Reçine karışımı 23 ºC sıcaklığa ayarlanarak içerisinde toplam reçine miktarının ağırlıkça %1 i miktarda hızlandırıcı kobalt ileve edilerek 2-3 dk cam bir babet ile manuel olarak karıştırılmıştır, daha sonra üzerine toplam reçine miktarının ağırlıkça %1,5 i miktarda başlatıcı MEKP peroksit ileve edilerek 1 dk kadar karıştırıldıktan sonra bu karışım cam plaka üzerine dökülmüştür. Bu reçine laboratuvar koşullarında ISO 291'e göre 12 saat bekletilerek [126] sertleşmesi beklenmiştir. Sertleşmesi tamamlanan plakalar kalıptan dikkatlice çıkartilerak 50 ºC de 1 saat , 80 ºC de 1 st ve son olarak 110 ºC de 1 st olmak üzere toplamda 3 saat etüvde kürleşme işlemine tabi tutulmuştur. Plakalar etüvün kapağı açık bırakılarak soğumaya bırakılmıştır. Bu şekilde ortoftalik, izoftalik ve tereftalik polyester reçine ve epoksi bazlı

vinilester reçine ile bunların birbirleri ile kombinasyonu şeklinde toplam 14 adet numune üretilmiştir. Üretilen numune kombinasyonları Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Fiziksel özellik testleri yapilen reçine karışımları.

Numune Kodu	Numune Bileşeni
O	Ortoftalik Polyester Reçine
I	İzoftalik Polyester Reçine
T	Tereftalik Polyester Reçine
VE	Vinilester Reçine
OV	Ortoftalik + Vinilester Reçine
IV	İzoftalik + Vinilester Reçine
TV	Tereftalik + Vinilester Reçine
OI	Ortoftalik + İzoftalik Reçine
OT	Ortoftalik + Tereftalik Reçine
TI	Tereftalik + İzoftalik Reçine
OIT	Ortoftalik + İzoftalik + Tereftalik Reçine
OIV	Ortoftalik + İzoftalik + Vinilester Reçine
TIV	Tereftalik + İzoftalik + Vinilester Reçine
OTV	Ortoftalik + Tereftalik + Vinilester Reçine

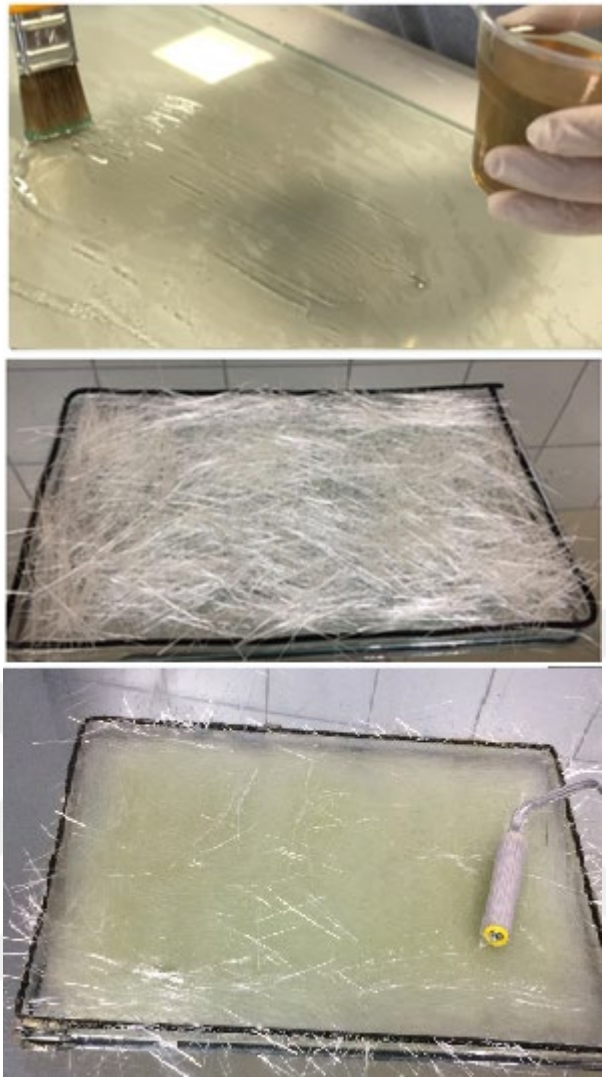
3.2.3. E-tipi Cam Elyaflı Hibrit Reçine Karışımlarının Hazırlanması

Çalışmanın üçüncü aşamasında; ikinci aşamada belirlenen hibrit reçine karışımlarına sırasıyla ağırlıkça %5, %10 ve %20 oranında 5 cm boyunda kesilmiş olan Cam Elyaf firmasından tedarik edilen KCR6H-2400-E kodlu E tipi kırpılmış elyaf takviyesi yapılarak yeni plakalar hazırlanmıştır. Elyaf takviyeli reçine karışım kombinasyonları ve bu numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışma planı Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Elyaf takviyeli reçine karışımları için yapilen deneysel çalışma planı.

Numune Bileşeni	**Karışımdaki Elyaf Takviyesi Ağırlıkça %**	**Testler**
Ortoftalik + Vinilester Reçine	%5	Eğilme dayanımı Çekme dayanımı
	%10	
	%20	
İzoftalik + Vinilester Reçine	%5	
	%10	
	%20	
Tereftalik + Vinilester Reçine	%5	
	%10	
	%20	
Ortoftalik + İzoftalik Reçine	%5	
	%10	
	%20	
Ortoftalik + Tereftalik Reçine	%5	
	%10	
	%20	
Tereftalik + İzoftalik Reçine	%5	
	%10	
	%20	
Ortoftalik + İzoftalik + Tereftalik Reçine	%5	
	%10	
	%20	
Ortoftalik + İzoftalik + Vinilester Reçine	%5	
	%10	
	%20	
Tereftalik + İzoftalik + Vinilester Reçine	%5	
	%10	
	%20	
Ortoftalik + Tereftalik + Vinilester Reçine	%5	
	%10	
	%20	

Elyaf takviyeli reçine karışım numunelerinin hazırlanacağı cam kalıplara ince bir film elde edecek biçimde sprey vaks ve akabinde fırça yardımı ile ince bir tabaka reçine uygulamasının ardından önceden 5 cm boyunda kesilmiş olan elyaflar cam kalıplar içerisine homojen şekilde serpilerek yerleştirilmiştir. Kalıpların reçine ile ıslatılması, elyafların kalıplara yerleştirilmesi ve ıslatılması işlemleri ile ilgili görsel Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Kalıpların ıslatılması ve takviyesinin kalıplara yerleştirilmesi.

Plakalar hazırlanırken ilk iki aşamada olduğu gibi yine toplam 550 g reçine karışımı kullanılmıştır. Reçinenin ağırlıkça %1 i kadar kobalt octoat hızlandırıcı, ağırlıkça %1,5 u kadar MEKP başlatıcı kullanılmıştır. Çizelge 3.6'da verilen elyaf takviyeli karışımları oluşturacak şekilde hazırlanan reçine karışımları cam kalıplara dökülmüştür. Karışımlar 23 ºC laboratuvar koşullarında sertleştirildikten sonra kalıplardan çıkarilerak 50 ºC'de 1 saat, devamında 80 ºC'de 1 saat ve son olarak 110 ºC'de 1 saat olmak üzere toplam 3 saat kürleşme işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra fırının kapağı açilerak kendiliğinden soğumaya bırakılmıştır. Plaka şeklindeki numuneler kalıptan dikkatlice çıkarılmıştır. Hazırlanan elyaf takviyeli hibrit reçine karışımlarının görseli Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Elyaf takviyeli hibrit reçine karışımlarına ait plakaların görseli.

Çalışma kapsamında, E tipi elyaf takviyeli hibrit reçine karışımlarından üretilen plakalardan alınan numunelere ait çekme testleri neticesinde çekme dayanımı hesaplanmasında Denklem (3.1) ve çekme E modülünün hesaplanmasında Denklem (3.2) kullanılmıştır [127]. E tipi elyaf takviyeli hibrit reçine karışımlarının eğilme dayanımı hesaplanmasında Denklem (3.3) ve eğilme E modülünün hesaplanmasında Denklem (3.4) kullanılmıştır [128].

3.2.4. SEM Görüntüleri

Çalışmada kapsamında üretilen ortoftalik, izoftalik ve tereftalik reçinenin her biri ile epoksi bazlı vinilester reçineden oluşan iki tabakalı plakaların ara yüzeylerinin SEM görüntüleri incelenmiştir. İki tabakalı olarak üretilen reçine plakalarının kalıplama işlemi ve bu plakaların ara yüzeyinin kalınlık ölçümü işleminin görseli sırasıyla Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da gösterilmiştir. SEM görüntülerinin alındığı cihaz Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.8. İki tabakalı olarak üretilen reçine plakalarının kalıplama işlemi.



Şekil 3.9. İki tabakalı olarak üretilen reçine plakalarına ait görsel.



Şekil 3.10. SEM analiz cihazı.

3.2.5. Fiziksel Testler

Plakaların üretiminde kullanılan reçine karışımları üzerinde öncelikle fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlemek için çeşitli testler yapılmıştır. Hibrit reçine karışımlarına ait yapilen fiziksel testler ve metot standartları Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Reçine karışımlarına ait fiziksel özellik testleri ve standartları.

Fiziksel Özellik Test Parametreleri	Test Standartları
Jelleşme süresi	ISO 2535 [129]
Jelleşme sıcaklığı	ASTM D 3056 [130]
Pik ekzoterm sıcaklığı	ASTM D 2471-99 [131]
Viskozite	ISO 2555[132]

Hammadde olarak kullanılan doymamış polyester reçinelerde jelleşme süresi ve pik ekzoterm sıcaklığı testlerinin gerçekleştirilmesinin amacı reçinenin sertleşme özelliklerini belirlemektir. Bu testlerde reçineyi 25 °C'de koşullandırmak suretiyle, hızlandırıcı ve katalizörle karıştırarak ve jel zamanını ve pik ekzoterm sıcaklığı ölçülmüştür. Bir beher içerisinde 100 g ağırlığında tartilen reçine numunesi plastik bir kap içinde 25 °C'de su banyosunda koşullandırılmıştır. Daha sonra bir cam pipet yardımı ile ağırlıkça %1 oranındaki hızlandırıcı ileve edilerek cam çubukla 2-3 dk

süreyle iyice karıştırılmıştır. Ardından bir cam pipet yardımı ile ağırlıkça %1,5 oranındaki başlatıcı metil etil keton peroksit (MEKP) ileve edilerek cam çubukla 1 dk kadar karıştırılmıştır. MEKP ileve edildiği anda bir kronometre yardımı ile geçen süre kaydedilmeye başlanmıştır. Bir termokupl ucu reçine numunesinin orta noktasına gelecek şekilde sabitlenerek sıcaklık da aynı zamanda kaydedilmeye başlanmıştır. Geçen her 1 dakikada bir zaman ve sıcaklık kaydedilerek reçinenin jelleşmeye başladığı (katılaşma gerçekleştiğinde) jel zamanını ve sıcaklığı kaydedilmiştir. Reçine maksimum sıcaklığa ulaşıldığında ve sıcaklık düşmeye başladığında; bu maksimum değerler pik ekzoterm zamanını ve sıcaklığı olarak kaydedilmiştir. Testlerde kullanılan düzenek Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Reçine karışımlarının jelleşme süresi ve pik ekzoterm sıcaklığının tespiti.

Reçinenin viskozitesi; hammadde matris olarak kullanıldığı kompozitlerde diğer bileşenlerin stres transferini sağlıklı olarak sağlayabilmesi açısından proses edilebilirliğini etkilemektedir. Cam behere 100 g reçine tartilerak reçine sıcaklığı 25 ± 0,5 °C'ye ayarlanmıştır. Brookfield marka DVE model cihaz ile 3 numaralı uç takilerak bu uç, sıvı reçine seviyesinin orta noktasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Milin altındaki hava kabarcıkları mevcut ise uzlaştırıldıktan sonra cihazın hızı 100 rpm değerine sabitlenmiştir. Cihazın motoru açilerak dijital okuma değeri sabitlenene kadar viskozimetrenin çalışmasına izin verilmiştir. Viskozimetre cihazı Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. DVE tipi Brookfield viskozimetre cihazı.

3.2.6. Barcol Sertlik Testi

Hibrit reçine numuneleri için gerçekleştirilen Barcol sertlik ölçümü testinde plakalar düz bir yüzeye yerleştirilerek GYZJ-934-1 tipi Barcol Sertlik cihazı ile ASTM D 2583 [133] standar metoduna göre test edilecek Şekil 3.13'te gösterildiği gibi yüzey üzerine dik olacak şekilde oturtulmuştur. Sıkıca tutulan cihazın kadran göstergesi maksimum seviyeye gelene kadar kasanın üzerinden kuvveti artırarak el ile hızlı bir şekilde aşağı doğru kuvvet uygulamak suretiyle maksimum okunan ölçüm değeri kaydedilmiştir.



Şekil 3.13. Hibrit reçine plakalarının barcol sertlik ölçümü.

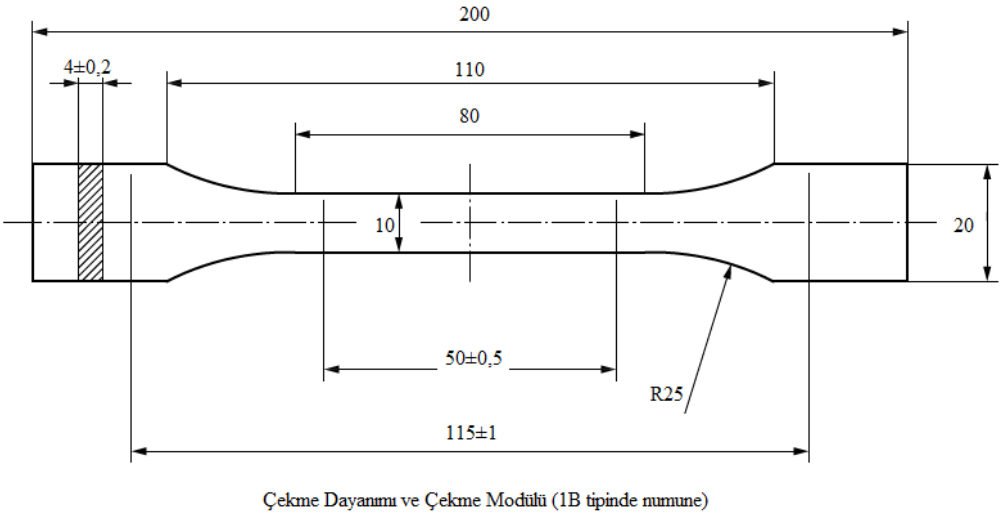
Üretilen reçine karışımları kombinasyonları ve bunların üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışma planı Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Hazırlanan reçine karışımları ve deneysel çalışma planı.

Numune Kodu	Numune Bileşeni	Testler
O	Ortoftalik Polyester Reçine	Charpy darbe dayanımı Eğilme dayanımı Çekme dayanımı SEM HDT FT-IR Analizi DSC Analizi TGA Analizi
I	İzoftalik Polyester Reçine	
T	Tereftalik Polyester Reçine	
VE	Vinilester Reçine	
OV	Ortoftalik + Vinilester Reçine	
IV	İzoftalik + Vinilester Reçine	
TV	Tereftalik + Vinilester Reçine	
OI	Ortoftalik + İzoftalik Reçine	
OT	Ortoftalik + Tereftalik Reçine	
TI	Tereftalik + İzoftalik Reçine	
OIT	Ortoftalik + İzoftalik + Tereftalik Reçine	
OIV	Ortoftalik + İzoftalik + Vinilester Reçine	
TIV	Tereftalik + İzoftalik + Vinilester Reçine	
OTV	Ortoftalik + Tereftalik + Vinilester Reçine	

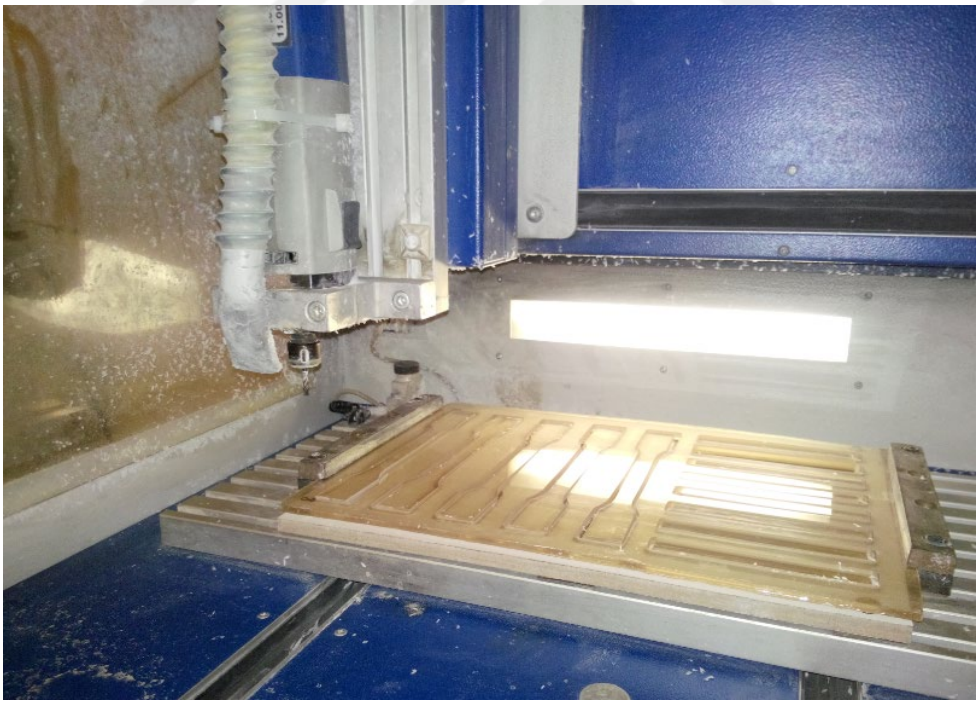
3.2.7. Çekme Dayanımı Testi

Plaka şeklindeki elyafsız hibrit reçine karışımı ve elyaflı hibrit reçine karışımına ait çekme testi numuneleri kalıptan dikkatlice çıkarılmış ve bu plakalar, yapılacak analizin standartlarına uygun olarak elmas uçlu mekanik kesim cihazıyla kesilmiştir. Kesilen numuneler oda koşullarında, 3 günlük bekleme süresinin ardından çekme testine tabi tutulmuşlardır. Üretilen sertleşmiş reçine plakalarından mekanik test başına minimum 3'er adet numune kesilmiştir. Çekme testi ISO 527-1 [127] standardına uygun olarak 1 mm/dk test hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme dayanımı testine tabi tutulan numunelerin boyutları milimetre cinsinden Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Çekme dayanımı testine tabi tutulan numune boyutları.

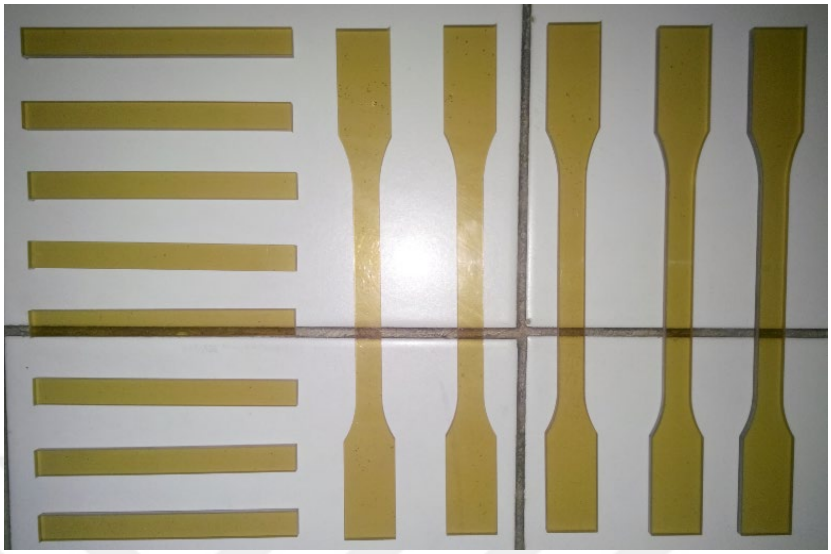
Kalıptan çıkarilen numunelerin kesim işlemi istenilen boyutların bilgisayar programına girilerek otomatik olarak yapıldığı özel kesim cihazında gerçekleştirilmiştir. Numune kesim cihazı ve kesim işlemi Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



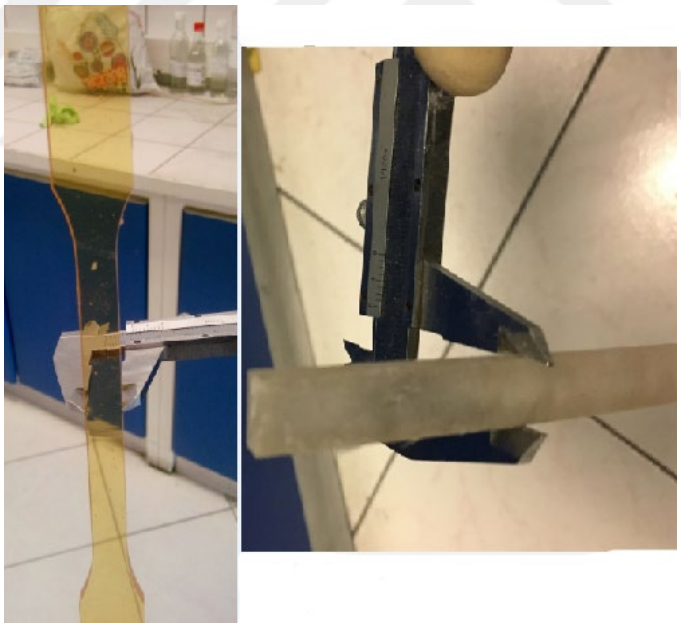
Şekil 3.15. Reçine plakalarından mekanik test numunelerinin kesim işlemi.

Mekanik teste tabi tutulan tüm numunelerin kalınlık, genişlik ve uzunluk gibi boyut ölçümleri 0,01 mm hassasiyetteki dijital kumpas yardımı ile yapılmıştır. Reçine karışımlarından üretilen plakalardan kesilen mekanik test numunelerine ait görsel Şekil

3.16’da, numunelerin ölçümüne ait görsel Şekil 3.17’de, çekme dayanımı testinin gerçekleştirilmesi ile ilgili resim Şekil 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3.16. Reçine eğilme ve çekme dayanımı test numuneleri.



Şekil 3.17. Reçine eğilme ve çekme dayanımı test numunelerinin boyutsal ölçümü.



Şekil 3.18. Reçine karışımlarının çekme dayanımı testi.

Elyaf takviyeli reçine karışımlarından üretilen plakalardan kesilen mekanik test numunelerine ait çekme dayanımı testinin gerçekleştirilmesi ile ilgili resimler ise Şekil 3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.19. Elyaf takviyeli reçine karışımlarının çekme dayanımı testi.

Çalışma kapsamında, reçine karışımlarından üretilen plakalardan alınan numunelere ait çekme testleri neticesinde çekme dayanımı ve çekme E-modülü değerlerinin hesaplanmasında aşağıda verilen formüller kullanılmıştır.

Reçine karışımlarının çekme dayanımı hesaplanmasında Denklem (3.1) ve çekme E modülünün hesaplanmasında Denklem (3.2) kullanılmıştır [127].

Formülde;

$$\sigma_{ç} = \frac{F}{A} \tag{3.1}$$

$$E_{ç} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \tag{3.2}$$

$\sigma_{ç}$: Çekme dayanımı (MPa),

F: Yük (N),

A: Alan (mm^2),

$E_{ç}$: Çekme E modülü (MPa),

ε_2: Birim deformasyon (0,0025),

ε_1: Birim deformasyon (0,0005),

σ_2: Birim deformasyon değeri ε_2= 0,0025'a karşılık gelen gerilme,

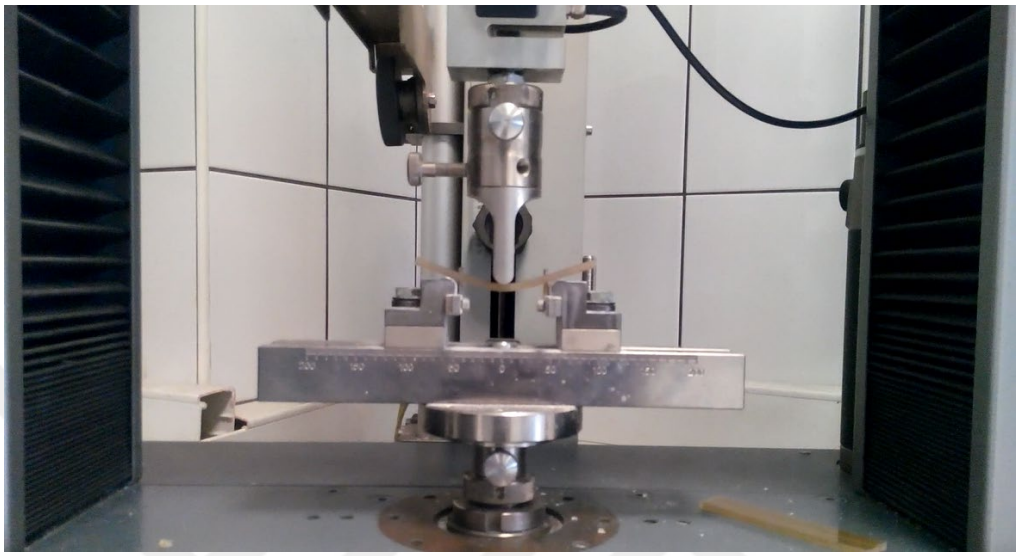
σ_1: Birim deformasyon değeri ε_1=0,0005'a karşılık gelen gerilmeyi ifade etmektedir.

3.2.8. Eğilme Dayanımı Testi

Plaka şeklindeki elyafsız hibrit reçine karışımı ve elyaflı hibrit reçine karışımına ait eğilme dayanımı testi numuneleri kalıptan çıkarilerak, elmas uçlu mekanik kesim cihazıyla standartlara uygun boyutlarda kesilmiştir. Kesilen numuneler oda koşullarında, 3 günlük bekleme süresinin ardından teste tabi tutulmuşlardır. Üretilen sertleşmiş reçine plakalarından mekanik test başına minimum 3'er adet numune kesilmiştir. Eğilme testi ISO 178 [128] standardına uygun olarak, 2 mm/dk test hızında gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımı testine tabi tutulan numunelerin boyutları milimetre cinsinden 100 mm x 80 mm x 4mm olarak hazırlanmıştır.

Kalıptan çıkarilen numunelerin kesim işlemi istenilen boyutların bilgisayar programına girilerek otomatik olarak yapıldığı özel kesim cihazında gerçekleştirilmiştir. Numune

kesim cihazı ve kesim işlemi Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Reçine karışımlarından üretilen plakalardan kesilen eğilme test numunelerine ait görsel Şekil 3.20'de, elyaf takviyeli reçine karışımlarının eğilme dayanımı testinin gerçekleştirilmesi ile ilgili resim Şekil 3.21'de verilmiştir.



Şekil 3.20. Reçine karışımlarının eğilme dayanımı testi.



Şekil 3.21. Elyaf takviyeli reçine karışımlarının eğilme dayanımı testi.

Çalışma kapsamında, reçine karışımlarından üretilen plakalardan alınan numunelere ait eğilme testleri neticesinde eğilme dayanımı ve eğilme E-modülü değerlerinin hesaplanmasında aşağıda verilen formüller kullanılmıştır.

Reçine karışımlarının eğilme dayanımı hesaplanmasında Denklem (3.3) ve eğilme E modülünün hesaplanmasında Denklem (3.4) kullanılmıştır [128].

$$\sigma_e = \frac{3xFxL}{2xbxh^2} \tag{3.3}$$

$$E_e = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \tag{3.4}$$

σ_e= Eğilme dayanımı (MPa),

F: Yük (N),

L: Mesnet aralığı (mm),

E_e: Eğilme E modülü (MPa),

ε_2: Birim deformasyon (0,0025),

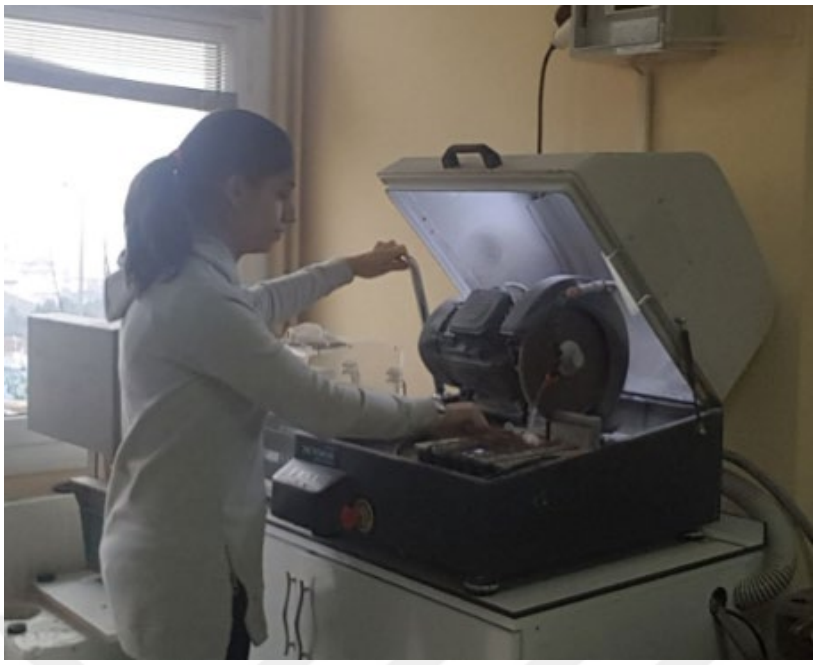
ε_1: Birim deformasyon (0,0005),

σ_2: Birim deformasyon değeri ε_2= 0,0025'a karşılık gelen gerilme,

σ_1: Birim deformasyon değeri ε_1=0,0005'a karşılık gelen gerilmeyi ifade etmektedir.

3.2.9. Charpy Darbe Dayanımı Testi

Hibrit reçine plakalarına uygulanan ve ISO 179-1 standardına göre gerçekleştirilen charpy darbe testinde, uygun boyutlu çekiç koluna sahip sarkaç sistemine sahip olan cihaz kullanılmıştır. Numunelerin darbeye maruz bırakılması durumunda plastiğin kırılma dayanımının belirlenmesine yönelik olan bu yöntemde, plakaların her birinden ISO 179-1 standardına göre boyutları 110x15x10 mm olan tip-3'e uygun olarak en az 5 adet test numunesi hazırlanmıştır [134]. Numunelerin belirtilen boyutlarda kesiminde kullanılan sulu kesim cihazı Şekil 3.22'de gösterilmiştir.

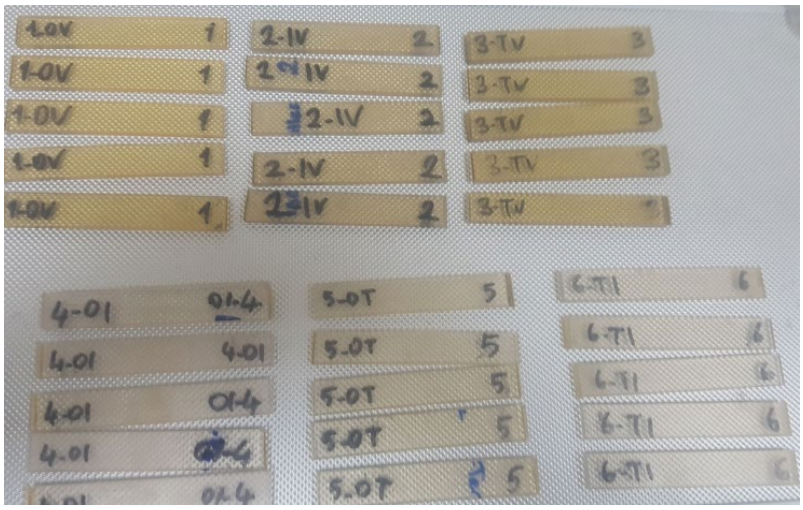


Şekil 3.22. Sulu kesim cihazında charpy test numuneleri kesim işlemi.

Numuneler elyaf takviyesiz olduğundan ve sadece reçine karışımlarından oluştuğu için darbe dayanımlarının takviyeli kompozitlere kıyasla düşük olacağı öngörüldüğünden, sarkaç enerjisi 1 J seçilmiştir. Charpy test cihazı Şekil 3.23'te, kesilen numunelerin resimleri ise Şekil 3.24'te sunulmuştur. Charpy testleri sonucu kırılen numuneler ise Şekil 3.25'te gösterilmiştir.



Şekil 3.23. Charpy test cihazı.



Şekil 3.24. Charpy test numuneleri.



Şekil 3.25. Charpy testleri sonucu kırilen numuneler.

Reçine karışım numunelerinin charpy darbe dayanımının hesaplanması aşağıdaki denkleme uygun olarak (3.5) yapılmıştır [135].

Formülde;

$$a_{cU} = \frac{E_c}{hxb} x10^3 \quad (3.5)$$

a_{cU} = Charpy darbe dayanımı (kJ/m^2),

h= Kalınlık (0,01 m),

b= Genişlik (0,015 m),

E_c= Test numunesinin kırılmasıyla emilen düzeltilmiş enerji (J),

3.2.10. Isı altında Deformasyon Sıcaklığı (HDT) Testi

Hibrit reçine karışımlarına uygulanan HDT testi için ölçüleri 4 mm x 10 mm olarak hazırlanan 3 adet numune cihaz haznelerine yerleştirilerek manuel olarak içinde yağ bulunan ısıtma teçhizatının içine indirilmiştir. Isıtma teçhizatının teste başlarken sıcaklığı 25 °C olarak ayarlanmıştır. Sıcaklık sensörünün test parçasının bulunduğu derinliğe kadar daldırılması ve mümkün olduğu ölçüde test parçasına yakın olması sağlanarak seçilen 306 g ağırlığındaki yük hücreleri manuel olarak numune üzerine yerleştirilip test işlemi gerçekleştirilmiştir. Test ISO 75-1 e uygun olarak gerçekleştirilmiştir [136]. Testin gerçekleştirilmesinde bilgisayar bağlantılı HDT/Vicat standart cihazı kullanılmıştır. Cihaz görseli Şekil 3.26'da verilmiştir. Yük altında hazne içerisindeki sıvı test sıcaklığına doğru ısıtıldıktan sonra tüm numuneler için, gerekli eğime, dalma mesafesine veya istenilen aşamaya ulaşıldığında ısıtma ünitesi otomatik olarak kapatılmış ve test işlemi sonlandırılmıştır. 3 numunenin test sonucunun ortalaması alınarak, bu ortalama değer HDT sıcaklığı olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.26. HDT test cihazı.

3.2.11. FT-IR (Fouirer Transform Infrared Spektrofotometre)

Hazırlanan hibrit reçine karışımlarının kimyasal özellikleri belirlemek ve reaksiyonlar sonucu elde edilen ürünlerin kimyasal karakterizasyonunu araştırmak amacıyla Şekil 3.27'de görseli verilen ATR-FT-IR cihazı kullanılmıştır. FT-IR analizleri, Shimadzu marka, IR-Prestige 21 model FT-IR cihazı ile 4 cm-1 çözünürlükte ve 20 tarama sonucunda elde edilmiştir. Bu amaçla, katı numunelerin ZnSe kristalinde belli bir basınçla sıkıştırılması ile elektromanyetik spektrumun 600-4000 cm^{-1} aralığında

bulunan bölgedeki karakteristik moleküler absorpsiyon pikleri belirlenmiştir. Bu kapsamda oda koşullarında akışkan özellikte bulunan numunelerden 0,5 ml numune bölmesine damlatılmış ve sıkıştırılmıştır. Numunelerin moleküler absorpsiyon pikleri değerlendirilerek, karakteristik yapileri ve polimer davranışları incelenmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.27. FT-IR cihazı.

3.2.12. TGA (Termo Gravimetrik Analiz)

Hazırlanan hibrit reçine karışımlarının termal karakterizasyonunun incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen TGA analizlerinde numune örnekleri 1 saat boyunca 130 °C'lik fırında sertleştirilmiştir. 5 mg örnek, azot atmosferinde değişik ısıtma hızlarıyla 50 °C den 800 °C'ye ısıtılmıştır. TGA ile 10 °C/dakika hızında analiz edilmiş ve bu sayede termal dengeleri karşileştırılmıştır. TGA analizlerinin gerçekleştirildiği cihaz Şekil 3.28'de gösterilmiştir.

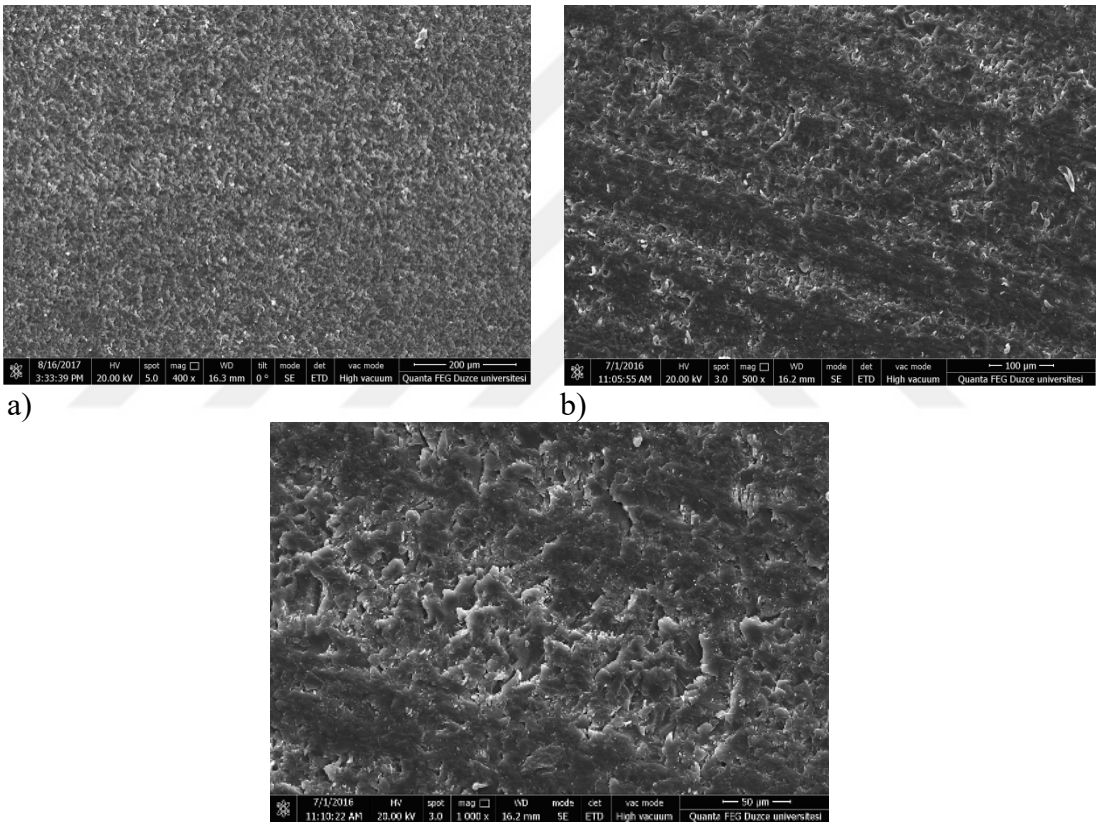


Şekil 3.28. TGA cihazı.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. SEM GÖRÜNTÜLERİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

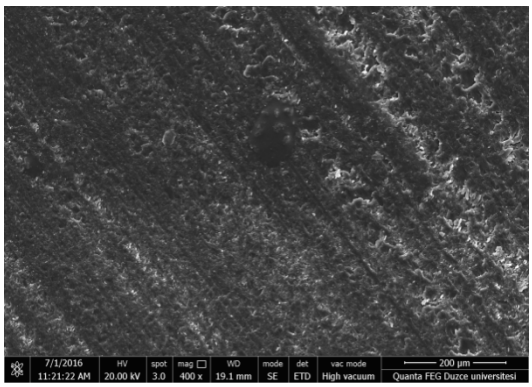
Çalışmada kullanılan ortoftalik, izoftalik ve tereftalik polyester reçinelerin her birinin ayrı ayrı epoksi bazlı vinilester reçine ile olan iki tabakalı test grupları için üretilen plakalardan alınan numunelerin ara yapışma yüzeyleri üzerinde SEM görüntüleri alınarak morfolojik analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir. Görüntüler, her bir reçine için panoramik 200 µm, 100 µm ve 50 µm olarak verilmiştir.



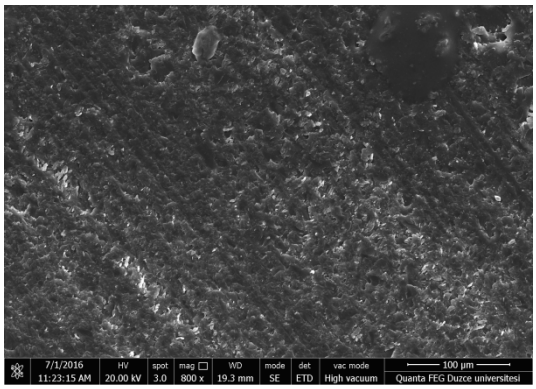
a) b)

c)

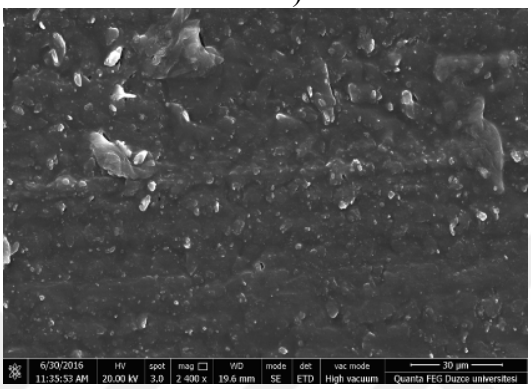
Şekil 4.1. Ortoftalik-vinylester SEM görüntüsü a) 200 µm b) 100 µm c) 50 µm.



a)

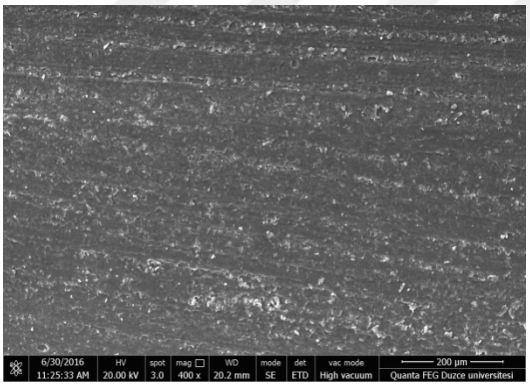


b)

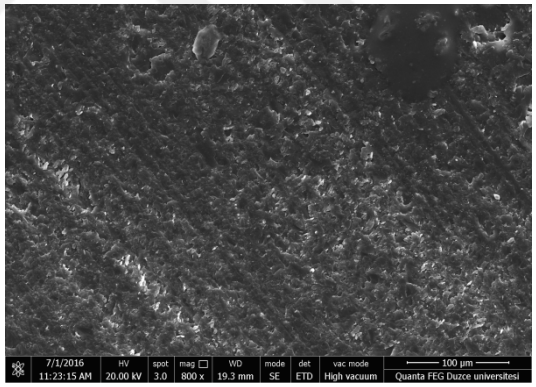


c)

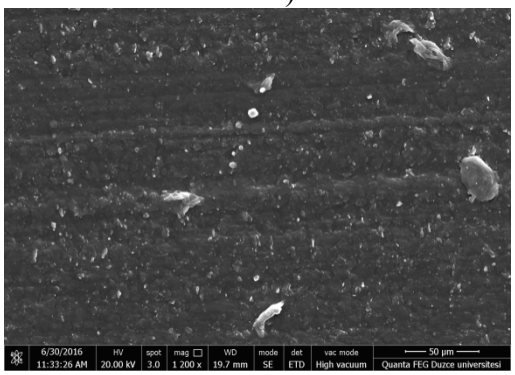
Şekil 4.2. İzoftalik-vinylester SEM görüntüsü a) 200 µm b) 100 µm c) 50 µm.



a)



b)



c)

Şekil 4.3. Tereftalik-vinylester SEM görüntüsü a) 200 µm b) 100 µm c) 50 µm.

Tüm iki tabakalı reçine plakalarının ara yüzeylerine dik olarak alınan SEM görüntüleri incelendiğinde, matris yapının homojen olduğu, içerisinde safsızlık ve hava kabarcığı vs. herhangi bir boşluklu yapı oluşumunun olmadığı görülmektedir. SEM görüntülerinin tam orta paralel ekseninde yer alan; özellikle iki reçine tipinin yapıştığı numune plaka ara yüzeylerinde yeterince homojen ve aynı şekilde boşluk bulunmayacak şekilde bir yapışma sağlandığı görülmüştür.

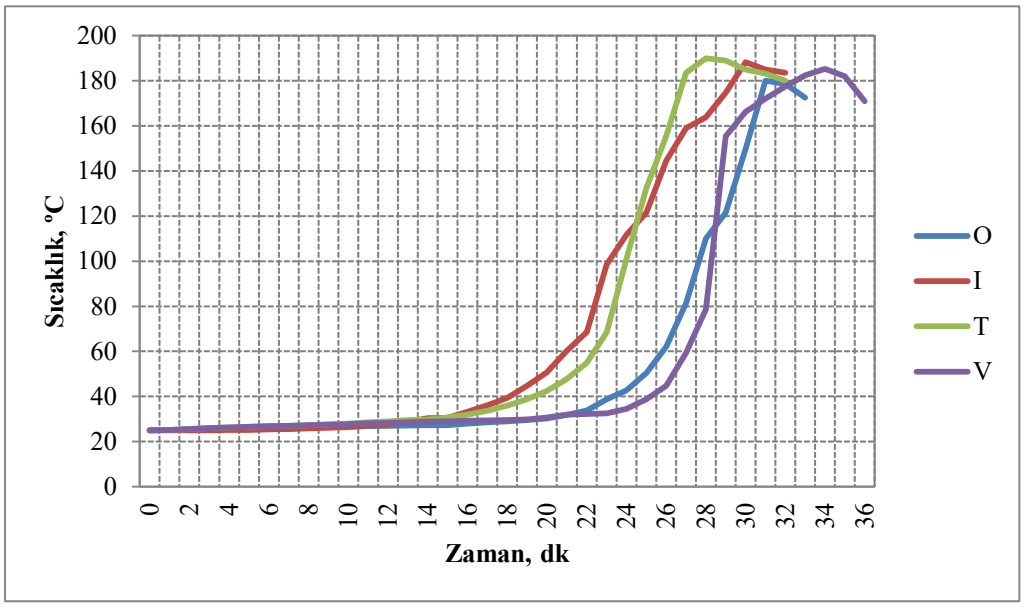
4.2. FİZİKSEL TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Çalışmanın ikinci aşamasında kullanılan doymamış polyester ve bisfenol A epoksi bazlı vinilester reçinelerin tamamen birbirine karıştırılmak suretiyle farklı kombinasyondaki ikili ve üçlü hibrit karışımları hazırlanarak üzerinde gerçekleştirilen Jelleşme süresi, jelleşme sıcaklığı, pik ekzoterm sıcaklığı ve viskozite test sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Hibrit reçine karışımlarına ait fiziksel test sonuçları.

Numune Kodu	Jelleşme süresi (dk)	Jelleşme sıcaklığı (°C)	Pik ekzoterm sıcaklığı (°C)	Viskozite (cp)
O	15,0	27,3	180,0	250
I	15,1	30,6	188,2	296
T	14,3	29,8	190,0	234
VE	23,5	32,5	185,3	400
OV	20,3	30,8	184,3	300
IV	18,5	33,4	180,0	365
TV	17,2	32,6	181,3	306
OI	12,2	29,6	188,5	288
OT	14,3	30,0	181,0	240
TI	11,6	31,3	186,8	268
OIT	12,5	31,6	184,0	286
OIV	19,0	31,0	182,3	300
TIV	17,3	31,9	185,4	360
OTV	18,2	31,8	182,6	304

Ham reçinelere ait jelleşme ve pik ekzoterm sıcaklığı test verileri Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Ham reçinelere ait jelleşme ve pik ekzoterm sıcaklığı eğrileri.

Şekil 4.4 incelendiğinde vinilester reçinenin jelleşme süresi diğer reçinelere göre daha uzun çıkmıştır. Bu; vinilester reçinenin yapısındaki farklılıklar ve içeriğinde yer alan yer alan inhibitör gibi katkı maddelerinin miktarının farklı olması olabilir.

Reçine numunelerinin jelleşme sıcaklığı değerleri 27,3 °C ile 33,4 °C arasında elde edilmiştir. Reçine viskozitesi sertleşme reaksiyonu sırasında 27,3 °C ile 33,4 °C arasında pelte kıvamına ulaştığı gözlenmiştir. Jelleşme sıcaklığının artması ise, serbest radikallerin miktarının artması ile birlikte ekzotermik reaksiyondan kaynaklanmaktadır. Hibrit karışımlarda elde edilen jelleşme sıcaklıklarının büyük değişiklik göstermediği ve beklenen sıcaklık değerlerinde jelleşmeye başladığı tespit edilmiştir. Ayrıca tüm reçine ve bunların hibrit karışımlarının pik ekzoterm sıcaklığı değerlerinin 180 °C ile 190 °C arasında elde edildiği görülmüştür.

Carbas ve ark. hazırladıkları iki bileşenli epoksi karışımların yüksek mukavemet değerlerini ve sertliği kürleşme sıcaklığının 100 °C ile 120 °C üzeri sıcaklıklarda olumlu etkilediğini görmüşlerdir [108].

Viskozimetre cihazı ile yapilen ölçümler sonucunda, vinilester reçinenin ve içeriğinde vinilester reçine bulunan hibrit reçine karışımlarının viskozite değeri daha yüksek bulunmuştur. Viskozite değerleri 250 ile 400 cp arasında değişmekle birlikte bu

karışımların birbirinden çok farklı olmayacak şekilde akışkanlık direncine sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Turcsan ve Meszaros, hibrit reçinelerinin bileşenlerinin ham reçine olarak yüksek enerji absorbsiyonuna sahip olduklarından, matris olarak kullanıldığında da bu özelliklerini korumuş olduğunu bulmuşturlar [137].

4.3. BARCOL SERTLİK TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Hibrit reçine plakalarında sertleşme ölçüsü olarak değerlendirilen Barcol Sertlik değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Barcol sertlik değerlerinin 40 Barcol'un üzerinde olduğu ve bu sonuçlar pik ekzoterm sıcaklıkları ile birlikte değerlendirildiğinde tüm karışımların yeterli kürleşmeyi sağlandığı sonucuna varılmıştır.

Vinay, Govindaraju, Banakar hazırladıkları hibrit kompozitler üzerinde yaptıkları sertlik ölçümlerinde hibridizasyonun kompozitlerin ayırt edici özelliklerini ve sertliğini etkilediğini ortaya koymuşlardır [112].

Çizelge 4.2. Hibrit reçine karışımlarına ait barcol sertlik testi sonuçları.

Numune Kodu	Barcol Sertliği (barcol)
O	42
I	44
T	46
VE	43
OV	43
IV	42
TV	42
OI	44
OT	42
TI	44
OIT	43
OIV	43
TIV	43
OTV	43

4.4. ÇEKME DAYANIMI TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

4.4.1. Reçine Karışımlarının Çekme Test Sonuçları ve Değerlendirme

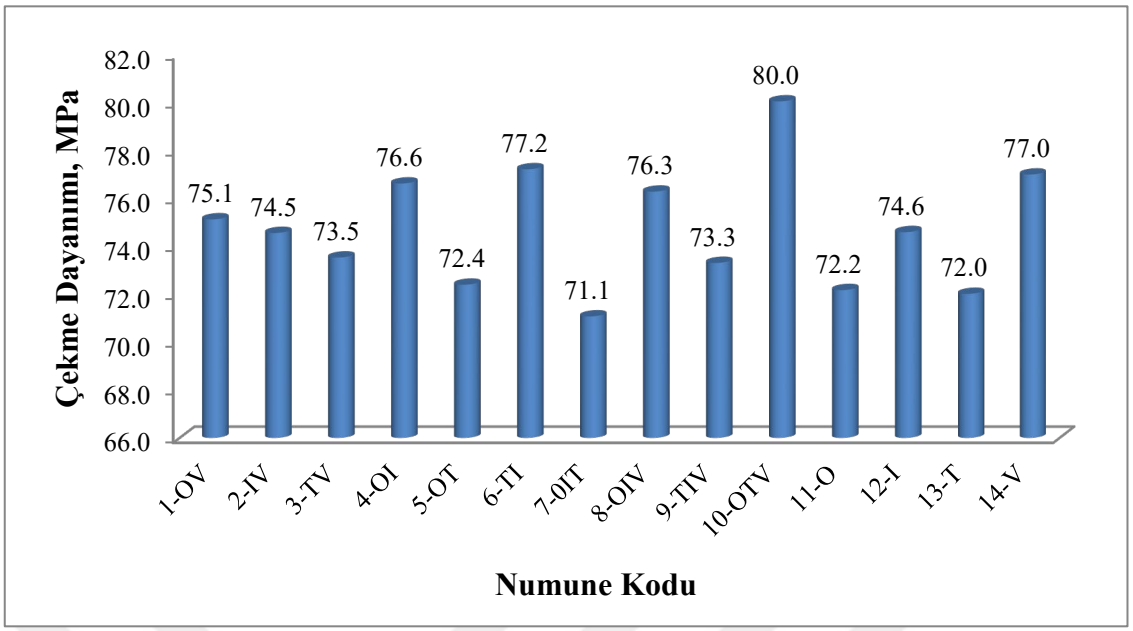
Bu çalışmada, farklı reçine türleri ve bu reçinelerin ağırlıkça eşit oranlarda hazırlanan hibrit karışımlarından üretilen plakalar üzerinde çekme dayanımı testleri

gerçekleştirilmiştir. Bu reçine plakalarının çekme dayanımı test sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Farklı reçine türleri ve karışımlarının çekme testi sonuçları.

Numune Kodu	Çekme Modülü, MPa	Çekme Dayanımı, MPa	Çekme Uzaması %
1-OV	3491	75,1	2,88
2-IV	3484	74,5	2,93
3-TV	3511	73,5	2,74
4-OI	3448	76,6	2,83
5-OT	3462	72,4	2,86
6-TI	3531	77,2	2,89
7-0IT	3399	71,1	2,76
8-OIV	3561	76,3	2,80
9-TIV	3719	73,3	2,68
10-OTV	3634	80,0	3,00
11-O	3396	72,2	2,80
12-I	3625	74,6	2,78
13-T	3445	72,0	2,76
14-V	3481	77,0	3,74

Farklı reçine türleri ve ikili ve üçlü hibrit karışımlara ait ortalama çekme dayanımı sonuçları ve karşılaştırılması Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Farklı reçine ve hibrit karışımlarına ait ortalama çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.

Tek tip reçine ile yapılmış olan numunelerin çekme test sonuçları değerlendirildiğinde; en düşük çekme dayanımı değeri tereftalik ve ortoftalik reçineler için sırasıyla 72 MPa ve 72,2 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek çekme dayanımı değeri ise epoksi bazlı vinilester reçine için 77 MPa olarak elde edilmiştir. İzoftalik reçine ile yapılmış olan numunelerin çekme test sonuçları ise bunların arasında bir değer olan 74,6 MPa olarak tespit edilmiştir.

İki tip reçine ile yapılmış olan 6 adet hibrit plakalardan hazırlanan numunelerin sonuçlarına göre; en düşük çekme dayanımı değeri ortoftalik-tereftalik (OT) reçine karışımından 72,4 MPa şeklinde elde edilmiştir. En yüksek çekme dayanımı ise tereftalik-izoftalik (TI) reçine ve ortoftalik-izoftalik (OI) karışımından sırasıyla 77,2 MPa ve 76,6 MPa şeklinde tespit edilmiştir. Diğer 3 adet hibrit karışımlar kıyaslandığında; çekme dayanımı sonuçları düşükten yükseğe doğru sırasıyla ortoftalik-vinilester (OV), izoftalik-vinilester (IV), ve son olarak tereftalik-vinilester (TV) MPa şeklinde elde edilmiştir. En yüksek çekme dayanımı değerlerini veren iki bileşenli karışımlara bakıldığında her ikisinde de izoftlik reçine olduğu görülmektedir. Elde edilen bu değerlerin içerdiği reçinelerin tek tip reçine ile yapılmış olan numunelerinin çekme test sonuçlarına göre daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Üç tip reçine ile yapılmış olan 4 adet hibrit plakalardan hazırlanan numunelerin sonuçlarına göre; en düşük çekme dayanımı değeri ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT)

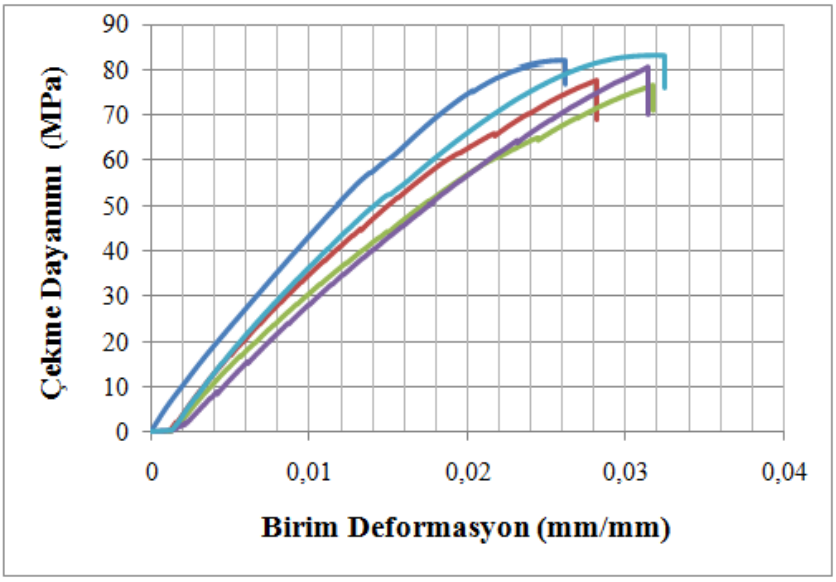
reçine karışımından 71,1 MPa şeklinde elde edilmiştir. En yüksek çekme dayanımı ise ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV) reçineden oluşan karışımından 80 MPa olarak elde edilmiştir. Kalan 2 adet hibrit karışımlar kıyaslandığında; çekme dayanımı sonuçları düşükten yükseğe doğru sırasıyla tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV), ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV) 73,3 MPa ve 76,3 MPa şeklinde elde edilmiştir. OTV hibrit reçinesinin çekme sonucu; ortoftalik, tereftalik ve vinilester reçinenin test sonuçlarından sırasıyla %10, %8, %3 daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Turcsan ve Meszaros, hibrit reçinelerin birbirine dolanmış faz yapısı matrise daha fazla esneklik sağlayarak çatlak yayılımının geçikmesine sebep olmuş olabildiğini belirtmişlerdir [137].

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, reçinelerin ikili ve üçlü karışımlar şeklinde hibrit olarak karıştırılmasının çekme dayanımını etkilediği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, bu tez çalışması kapsamında hedeflendiği şekilde bazı hibrit reçine karışım kombinasyonları ile yapilen test sonuçlarındaki çekme dayanımı değeri tek bileşenli reçine numunelerinin çekme dayanımı test sonuçlarına göre farklı sonuçlar elde edilmiştir.

Benzer şekilde Turcan ve Ark. epoksi ve viniester hibrit matris kullanarak, referanslara kıyasla %15,5 ve %10,8 daha yüksek çekme mukavemeti elde etmişlerdir. Bunun nedenini epoksi ve viniester hibritlerin bir reçine olarak daha yüksek enerji emilimine sahip olmaları ve faz sınırında iyi yapışma ile sonuçlanması olarak yorumlamışlardır [137].

Tüm karışımlar içerisinde çekme dayanımı performansı en iyi olan hibrit karışım OTV reçineden oluşan karışımından 80 MPa olarak ve içeriğindeki reçine türlerine kıyasla daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu bulunmuştur. OTV test numunelerinin çekme dayanımı-birim deformasyon eğrisi Şekil 4.6'da verilmiştir.

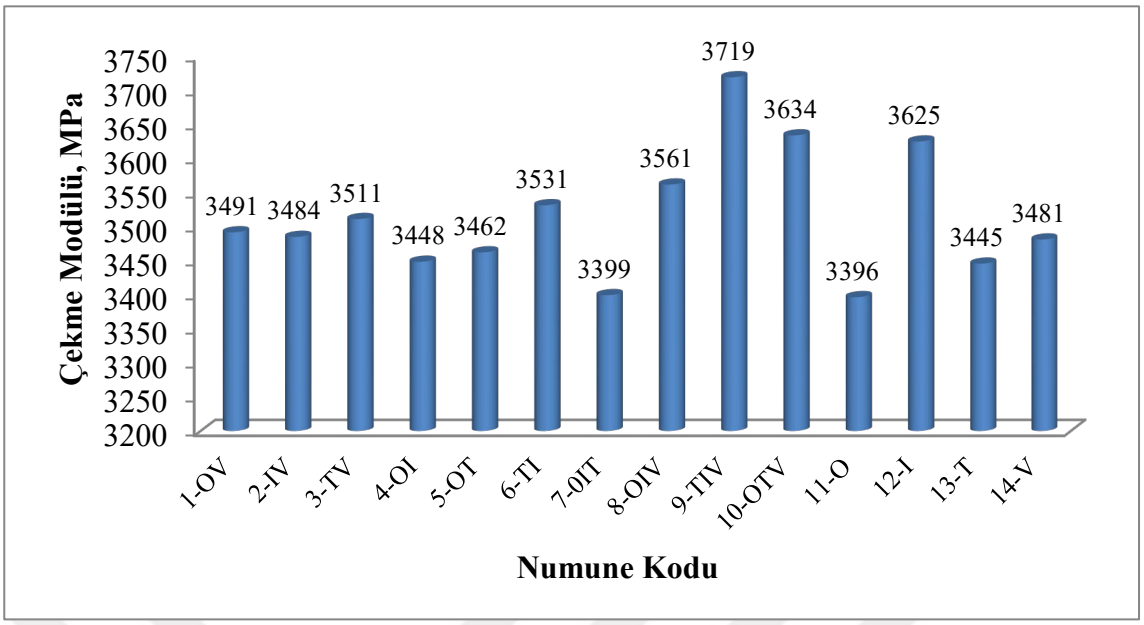


Şekil 4.6. OTV reçine karışımına ait çekme dayanımı-birim deformasyon eğrisi.

Farklı reçine türleri ve ikili ve üçlü hibrit karışımlara ait ortalama çekme E modülü sonuçları ve karşılaştırması Şekil 4.7'de verilmiştir.

Tek tip reçine ile yapılmış olan numunelerin çekme E modülü sonuçları değerlendirildiğinde; en düşük E modül değeri 3396 MPa ile ortoftalik reçine olduğu görülmüştür. En yüksek çekme E modül değeri ise 3625 MPa ile izoftalik reçineden olarak elde edilmiştir. Diğer iki reçinenin çekme E modülü sonucu düşükten yükseğe doğru sırası ile 3445 MPa sonucu ile tereftalik ve 3481 MPa test sonucu ile vinilester reçine için elde edilmiştir.

İki tip reçine ile yapılmış olan 6 adet hibrit plakalardan hazırlanan numunelerin çekme E modülü sonuçlarına göre; en düşük çekme dayanımı değeri ortoftalik-izoftalik (OI) reçine karışımından 3448 MPa şeklinde elde edilmiştir. En yüksek çekme E modülü değerleri ise tereftalik-izoftalik (TI) reçine karışımından 3531 MPa ve tereftalik-vinilester (TV) 3511 MPa olarak görülmüştür. Diğer 3 adet hibrit ikili karışım çekme E modülü sonucu kıyaslandığında; düşükten yükseğe doğru sırasıyla ortoftalik-tereftalik (OT) 3462 MPa, izoftalik-vinilester (IV) 3484 MPa, ortoftalik-vinilester (OV) 3491 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 4.7. Farklı reçine ve hibrit karışımlarına ait ortalama çekme elastikiyet modülü değerlerinin karşılaştırılması.

En yüksek çekme E modülü değerlerini veren karışımlara bakıldığında her ikisinde de tereftalik reçine olduğu görülmektedir. Özellikle ortoftalik ve tereftalik reçine (OT) reçine karışımının çekme E modulu sonucu ortoftalik ve tereftalik çekme E modulu sonucundan daha yüksek çıkmıştır.

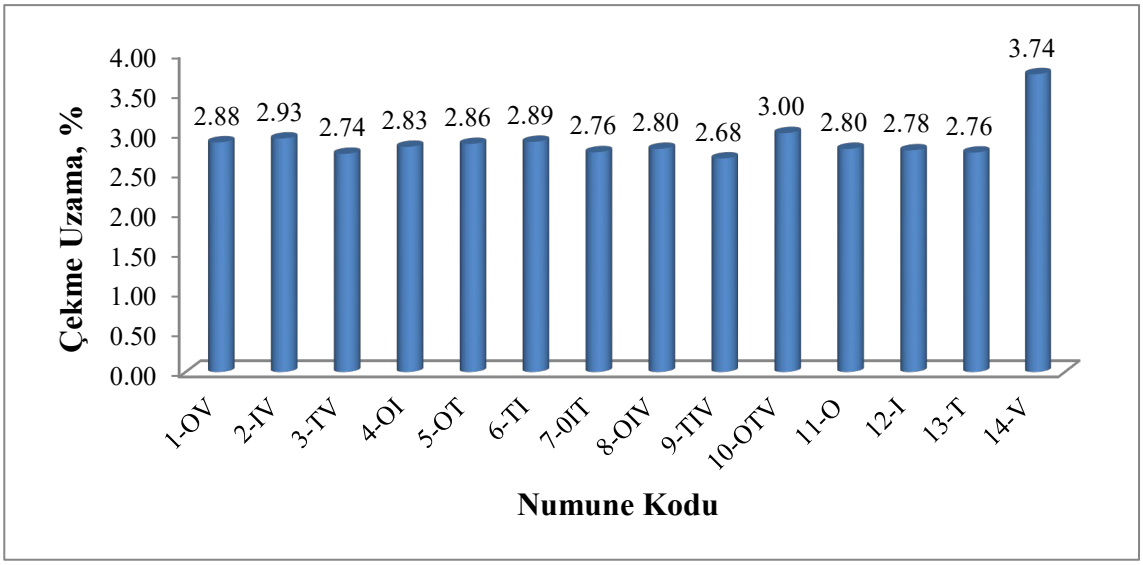
Üç tip reçine ile yapılmış olan 4 adet hibrit plakalardan hazırlanan numunelerin çekme E modülü test sonuçlarına göre; en düşük değeri ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT) reçine karışımından 3399 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek sonuç ise tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV) karışımından 3719 MPa bulunmuştur. Diğer 2 adet hibrit karışımlar kıyaslandığında; çekme dayanımı sonuçları düşükten yükseğe doğru sırasıyla ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV), ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV) 3561 MPa ve 3634 MPa şeklinde elde edilmiştir. En yüksek çekme E modülüne sahip iki test karışımında tereftalik ve vinilester reçine beraber olduğu görülmektedir. Ortoftalik ve izoftalikli reçinelerin beraber kullanıldığı hibrit karışımlarda ise en düşük iki çekme E modulu sonucu elde edilmiştir.

Khan ve Simpson, Vinilester ve polyester reçinesinin gerilme birim deformasyon davranışlarını kıyaslamışlardır. Polyester reçinesi söz konusu olduğunda, akış gerilimi, özellikle yüksek gerilme oranlarında, maksimum gerilmeden önemli ölçüde ve hızla düştüğünü; buna karşılık, vinilester reçinesine ait numuneler için deformasyon,

maksimum stresin ötesinde önemli plastik akışı içererek, akış stresinde kademeli bir düşüş meydana geldiğini tespit etmişlerdir [94].

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, reçinelerin ikili ve üçlü şekilde karıştırilerak elde edilen hibrit karışımlar çekme E modülü sonuçlarını etkilediği tespit edilmiştir. Tüm karışımlar içerisindeki çekme E modülü en yüksek olan hibrit karışım TIV reçineden oluşan karışımından 3719 MPa olarak elde edilmiştir.

Farklı reçine ve ikili ve üçlü hibrit karışımlara ait ortalama çekme uzama sonuçları ve karşılaştırması Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Farklı reçine ve hibrit karışımlarına ait ortalama çekme uzama değerlerinin karşılaştırılması.

Çalışmada kullanılan tek tip reçine ile hazırlanan plaka numunelerinin kopma uzaması değerleri incelendiğinde; en yüksek %3,74 olarak vinilester reçine bulunmuştur. Ortoftalik, izoftalik ve tereftalik reçinelerin kopma uzama değerleri %2,76 ile %2,8 civarında elde edimiştir. Aynı şekilde iki reçine içeren karışımlarda en yüksek uzama değeri %2,93 ile IV, en düşük uzama değeri %2,74 ile TV reçine olacak şekilde, bu aralıkta birbirine yakın uzama değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Benzer durum üç reçineli hibrit karışımlarda da gözlenmiş olup; en düşük uzama değeri %2,68 ile TIV reçine ve en yüksek uzama değeri %3 ile OTV reçine olarak tespit edilmiştir. En yüksek uzama sonucuna sahip olan bu karışımların ortak bileşenlerinin izoftalik ve vinilester reçine olduğu ve en düşük test sonucuna sahip olan bu karışımların ortak bileşenlerinin ise tereftalik reçine olduğu görülmüştür. Tüm karışımlar içerisinde en yüksek

performans %3 uzama değeri ile OTV reçine olarak tespit edilmiştir. Ayrıca Ortoftalik, izoftalik ve tereftalik reçineli tüm karışımlarda bu reçinelerin tek başına kullanıldığı test numunelerinden elde edilen kopma uzamalarından daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Benzer şekilde Cherian ve ark.epoksi modifiyeli doymamiş polyester hibrit yapilerda enerji emme kapasitesi ve moleküler esneklik derecesinin çekme müdülüs değerlerini etkilediği ve zincirlerin dolanmış ve karmaşık bir yapıda olmasının çekme uzamasını artrdığını gözlemlemişlerdir [7]. You Y.J ve ark. yapmış oldukları vinilester ve polyester reçine hibridisazyonu hakkındaki çalışmalarında ile çekme dayanımı ve çekme modülünün değiştiği sonucuna varmışlardır [114].

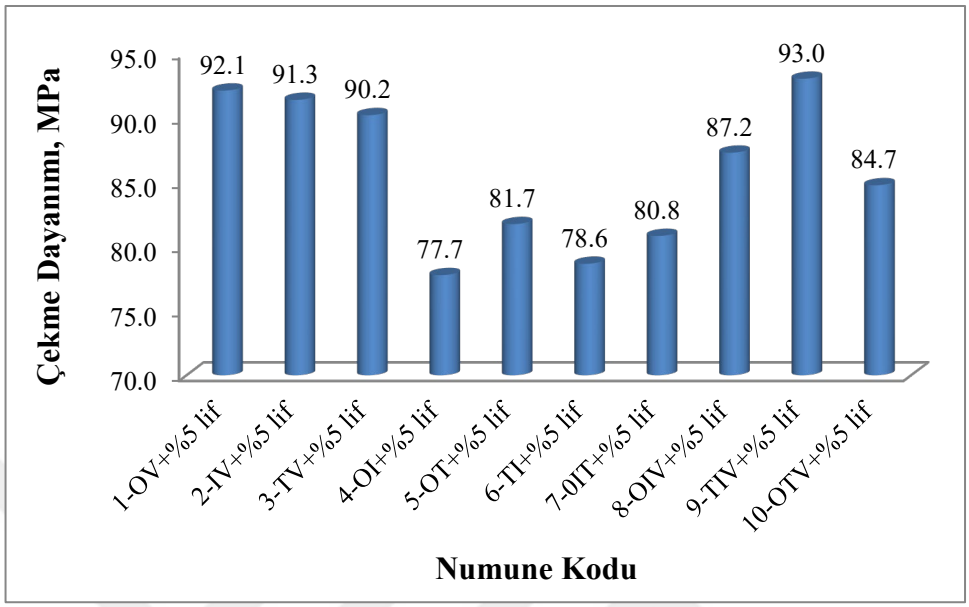
4.4.2. Cam Elyaflı Kompozitlerin Çekme Test Sonuçları ve Değerlendirme

Hibrit reçinelere ağırlıkça %5 cam elyaf takviye edilerek üretilmiş numunelerin çekme test bulguları Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 %5 cam elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin çekme testi sonuçları.

NUMUNE KODU	**Çekme Elastikiyet Modulü, MPa**	**Çekme Dayanımı, MPa**	**Çekme Uzaması %**
1-OV+%5 elyaf	4265	92,1	0,68
2-IV+%5 elyaf	4078	91,3	0,95
3-TV+%5 elyaf	4093	90,2	0,92
4-OI+%5 elyaf	4554	77,7	0,64
5-OT+%5 elyaf	4703	81,7	0,68
6-TI+%5 elyaf	3973	78,6	0,72
7-OIT+%5 elyaf	4434	80,8	0,68
8-OIV+%5 elyaf	4684	87,2	0,86
9-TIV+%5 elyaf	3720	93,0	0,91
10-OTV+%5 elyaf	4735	84,7	0,74

Ağırlıkça %5 oranında cam elyaf takviyesi Yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme dayanımı, çekme E modüllleri ve çekme uzama değerleri sırasıyla Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de verilmiştir.



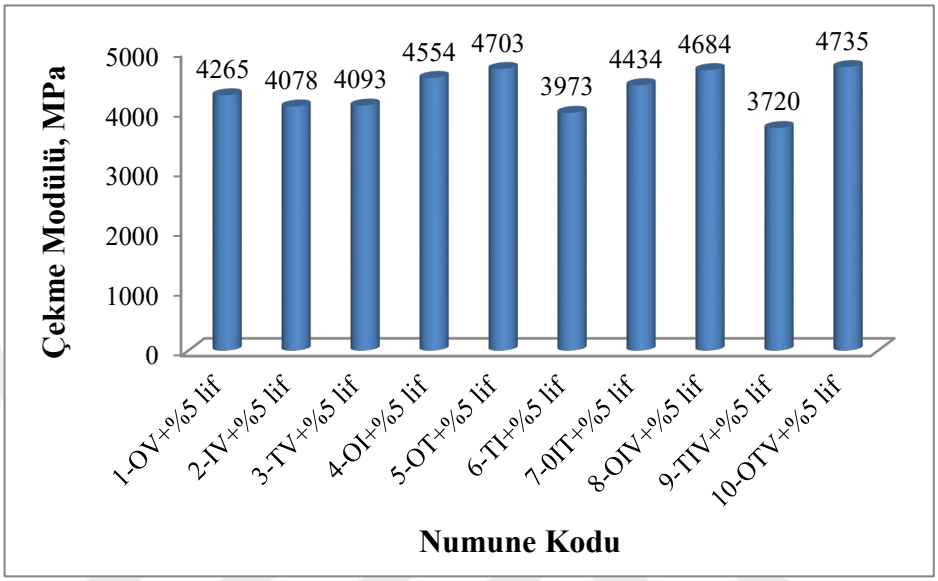
Şekil 4.9. Ağırlıkça %5 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.

İki farklı tip reçine ile yapılmış olan 6 adet hibrit reçine karışımının ağırlıkça %5 cam elyaf takviyesi ile hazırlanan numunelerinin çekme testi sonuçlarına göre; en düşük çekme dayanımı değeri ortoftalik-izoftalik (OI+%5) ve tereftalik-izoftalik (TI+%5) hibrit reçinelerinden sırası ile 77,7 MPa ve 78,6 MPa şeklinde elde edilmiştir. En yüksek çekme dayanımı değeri ise ortoftalik-vinilester (OV+%5) karışımından 92,1 MPa olarak elde edilmiştir. Diğer 3 adet hibrit karışımlar kıyaslandığında ise çekme dayanımı sonuçları düşükten yükseğe doğru sırasıyla ortoftalik-tereftalik (OT+%5) 81,7 MPa, tereftalik-vinilester (TV+%5) 90,2 MPa ve son olarak izoftalik-vinilester (IV+%5) 91,3 MPa olarak bulunmuştur.

Üç tip reçine ile karışımı ile oluşturulan 4 adet hibrit reçinenin %5 cam elyaf takviyesi ile güçlendirilmiş plakalarının çekme dayanım değerleri sonuçlarına göre; en düşük çekme dayanımı değeri ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%5) reçine karışımlarından 80,8 MPa olarak bulunmuştur, en yüksek çekme dayanımı ise tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%5) reçineden oluşan karışımından 93 MPa olarak elde edilmiştir. Diğer 2 adet hibrit karışımlar kıyaslandığında; çekme dayanım sonuçları düşükten

yükseğe doğru sırasıyla ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV+%5) ve ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV+%5) 84,7 MPa ve 87,2 MPa şeklinde elde edilmiştir.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, %5 cam elyaf takviye edilmiş hibrit reçinelerin ikili ve üçlü karışımlarındaki en yüksek çekme dayanımı tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%5) reçineden oluşan karışımından 93 MPa olarak elde edilmiştir.



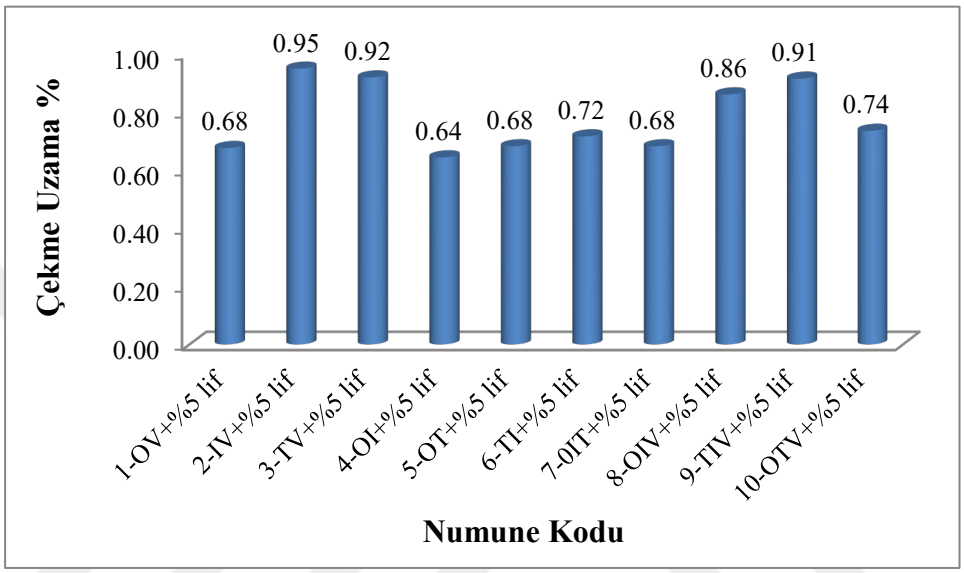
Şekil 4.10. Ağırlıkça %5 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme elastikiyet modülü değerlerinin karşılaştırılması.

İki farklı tip reçine ile yapılmış olan 6 adet hibrit reçine karışımının ağırlıkça %5 cam elyaf takviyesi ile hazırlanan numunelerin çekme E modül sonuçları değerlendirildiğinde en düşük çekme E modul değerine sahip cam elyaf takviyeli hibrit karışım 3973 MPa değeri ile tereftalik-izoftalik (TI+%5) olmuştur, en yüksek çekme E modul sonucu ise 4703 MPa değeri ile ortoftalik-tereftalik (OT+%5) hibrit karışımından elde edilmiştir. Diğer reçineler en düşük değerden en yüksek değere göre sırası ile 4078 MPa değeri ile izoftalik-vinilester (IV+%5), 4093 MPa değeri ile tereftalik-vinilester (TV+%5), 4265 MPa değeri ile ortoftalik-vinilester (OV+%5) ve 4554 MPa değeri ile ortoftalik-izoftalik (OI+%5) olarak bulunmuştur.

Üç tip reçine ile karışımı ile oluşturulan 4 adet hibrit reçinenin %5 cam elyaf takviyesi ile güçlendirilmiş plakalarının çekme E modül sonuçlarına göre en düşük değer 3720 MPa değeri ile tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%5) reçineden oluşan karışımından, en yüksek E modul sonucu ise ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV+%5) reçineden oluşan karışımından 4735 MPa olarak elde edilmiştir. Diğer iki hibrit karışımda

küçükten büyüğe doğru sıralandığında; 4434 MPa değeri ile ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%5) ve 4684 MPa değeri ile ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV+%5) olarak bulunmuştur.

%5 cam elyaf takviye edilmiş ikili ve üçlü reçine karışımları ile üretilen hibrit reçinelerin çekme E modül sonuçlarına göre en yüksek çekme E modül sonucu ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV+%5) karışımından 4735 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 4.11. Ağırlıkça %5 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme uzama değerlerinin karşılaştırılması.

Ağırlıkça %5 cam elyaf takviyesi ile hazırlanan iki farklı tip reçine ile yapılmış olan 6 adet hibrit reçine karışımının ile hazırlanan numunelerin çekme uzama sonuçları değerlendirildiğinde; en yüksek çekme uzama ise %0,95 değeri ile izoftalik-vinilester (IV+%5) olduğu, en düşük çekme uzama ise %0,64 değeri ile ortoftalik-izoftalik (OI+%5) olduğu görülmektedir. Diğer 4 farklı iki farklı tip reçine ile yapılmış olan numunenin sonucu en düşük değerden en yüksek değere doğru ortoftalik-vinilester (OV+%5), ortoftalik-tereftalik (OT+%5), tereftalik-izoftalik (TI+%5) ve tereftalik-vinilester (TV+%5) hibrit karışımı şeklinde sırasıyla %0,68, %0,68, %0,72 ve %0,92 olarak sıralanmaktadır.

Üç tip reçine ile karışımı ile oluşturulan 4 adet karışımın çekme uzama sonuçları değerlendirildiğinde; en yüksek çekme uzama ise %0,91 değeri ile tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%5) olduğu, en düşük çekme uzama ise %0,68 değeri ile ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%5) olduğu görülmektedir. Bunların dışındaki 2 adet üçlü

numuneler ise %0,74 ile ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV+%5) ve %0,86 ile ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV+%5) karışımlarıdır.

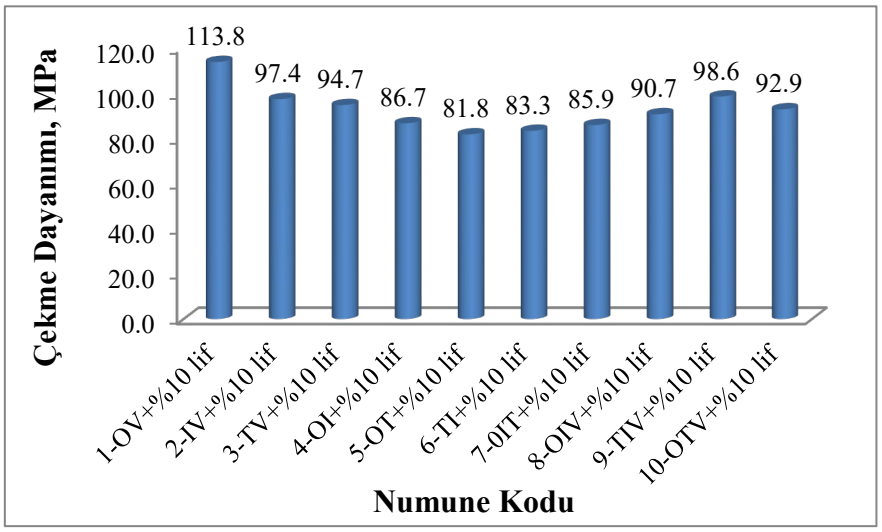
%5 cam elyaf takviye edilmiş ikili ve üçlü reçine karışımları ile üretilen hibrit reçinelerin çekme uzama sonuçlarına göre en yüksek çekme uzama değeri izoftalik-vinilester (IV+%5) hibrit reçineden oluşan karışımdan %0,95 olarak elde edilmiştir.

Hibrit reçinelere ağırlıkça %10 cam elyaf takviye edilerek üretilmiş numunelerin çekme test bulguları Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. %10 cam elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin çekme testi sonuçları.

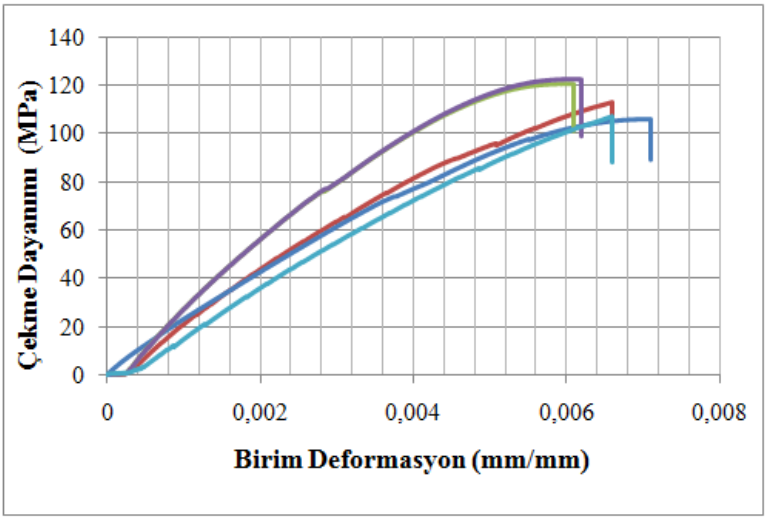
NUMUNE KODU	**Çekme Modülü, MPa**	**Çekme Dayanımı, MPa**	**Çekme Uzaması %**
1-OV+%10 elyaf	5741	113,8	0,65
2-IV+%10 elyaf	4869	97,4	0,91
3-TV+%10 elyaf	5233	94,7	0,93
4-OI+%10 elyaf	5141	86,7	0,63
5-OT+%10 elyaf	5211	81,8	0,60
6-TI+%10 elyaf	4890	83,3	0,71
7-0IT+%10 elyaf	5730	85,9	0,65
8-OIV+%10 elyaf	5327	90,7	0,66
9-TIV+%10 elyaf	5615	98,6	0,89
10-OTV+%10 elyaf	5298	92,9	0,72

Ağırlıkça %10 oranında cam elyaf takviyesi Yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme dayanımı, çekme E modüllleri ve çekme uzama değerleri sırasıyla Şekil 4.12, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.12. Ağırlıkça %10 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.

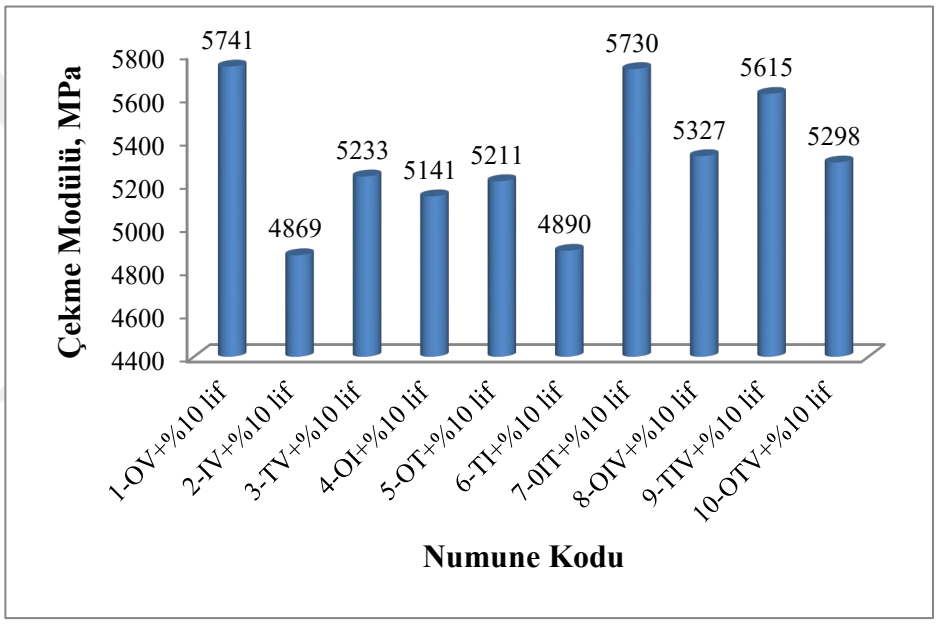
İki farklı tip reçine ile yapılmış olan 6 adet hibrit reçine karışımının ağırlıkça %10 cam elyaf takviyesi ile hazırlanan numunelerinin çekme testi sonuçlarına göre; en düşük çekme dayanımı değeri ortoftalik-tereftalik (OT+%10) karışımından 81,8 MPa olarak bulunmuştur. En yüksek çekme dayanım değeri ise ortoftalik-vinilester (OV+%10) karışımından 113,8 MPa olarak bulunmuş olup bu karışıma ait çekme dayanımı-birim deformasyon eğrisi Şekil 4.13'te verilmiştir. tur. Diğer 4 adet %10 elyaf takviyeli hibrit reçineli numunenlerin çekme dayanımı sonuçları küçükten büyüğe doğru; tereftalik-izoftalik (TI+%10) 83,3 MPa, ortoftalik-izoftalik (OI+%10) 86,7 MPa, tereftalik-vinilester (TV+%10) 94,7 MPa, izoftalik-vinilester (IV+%10) 97,4 MPa şeklinde sıralanmaktadır.



Şekil 4.13. OV+%10 hibrit kompozitinin çekme dayanımı-birim deformasyon eğrisi.

Üç tip reçine ile karışımı ile oluşturulan 4 adet hibrit reçinenin %10 cam elyaf takviyesi ile güçlendirilmiş plakalarının çekme dayanım değerleri sonuçlarına göre; en düşük çekme dayanımı değeri 85,9 MPa ile ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%10), en yüksek çekme dayanım değeri ise 98,6 MPa ile tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%10)'den elde edilmiştir. Diğerleri ise şu şekilde sıralanmıştır; ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV+%10) 90,7 MPa ve ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV+%10) 92,9 MPa olarak bulunmuştur.

%10 cam elyaf takviye edilmiş hibrit reçinelerin ikili ve üçlü karışımlarının çekme dayanım sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek çekme dayanımı ortoftalik-vinilester (OV+%10) reçineden oluşan karışımından 113,8 MPa olarak elde edilmiştir.

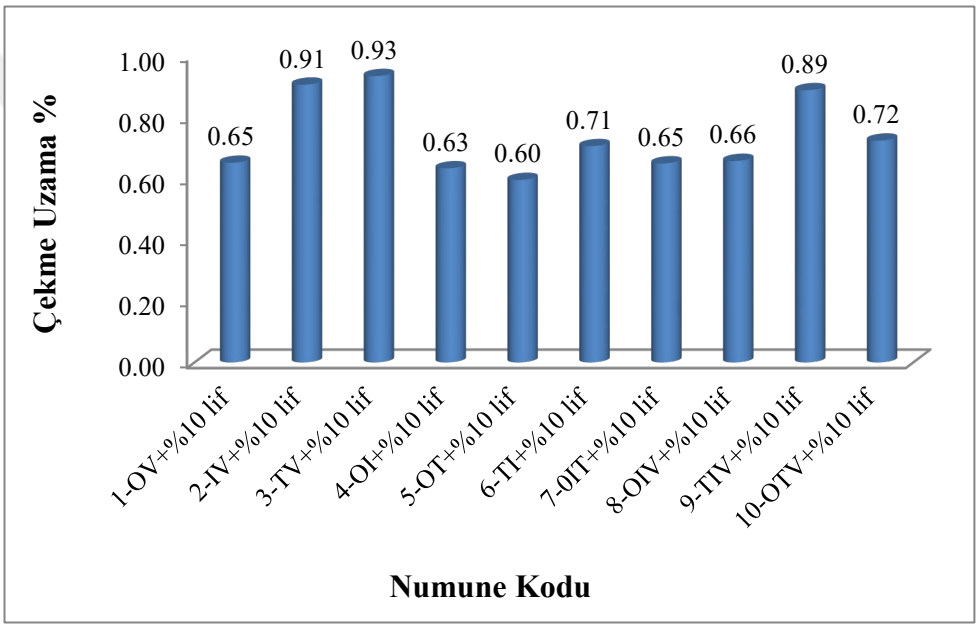


Şekil 4.14. Ağırlıkça %10 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme elastikiyet modülü değerlerinin karşılaştırılması.

Test sonuçlarına göre iki farklı tip reçine ile yapılmış olan 6 adet hibrit reçine karışımının ağırlıkça %10 cam elyaf takviyesi ile hazırlanan numunelerden elde edilen en düşük çekme E modul değerine sahip cam elyaf takviyeli hibrit karışımların 4869 MPa değeri ile izoftalik-vinilester (IV+%10) ve çok yakın sonuç bulduğumuz 4890 MPa ile tereftalik-izoftalik (TI+%10) olmuştur. En yüksek çekme E modul değeri ise 5741 MPa ile ortoftalik-vinilester (OV+%10) olduğu görülmüştür. Diğerleri ise küçükten büyüğe şu şekilde sıralanmaktadır; 5141 MPa ile ortoftalik-izoftalik (OI+%10), 5211 MPa ile ortoftalik-tereftalik (OT+%10) ve 5233 MPa ile tereftalik-vinilester (TV+%10) olduğu bulunmuştur.

Üç tip reçine ile karışımı ile oluşturulan 4 adet hibrit reçinenin %10 cam elyaf takviyesi ile güçlendirilmiş plakalarının çekme E modül sonuçlarına göre en düşük değerler 5298 MPa değeri ile ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV+%10) ve 5327 MPa ile ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV+%10)'den elde edilmiştir. En yüksek çekme E modül değeri ise 5730 MPa ile ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%10) olduğu bulunmuştur. Tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%10) hibrti karışımın sonucu ise 5615 MPa olarak bulunmuştur.

%10 cam elyaf takviye edilmiş ikili ve üçlü reçine karışımları ile üretilen hibrit reçinelerin çekme E modül sonuçlarına göre en yüksek çekme E modül sonucu ortoftalik-vinilester (OV+%10) karışımından 5741 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 4.15. Ağırlıkça %10 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme uzama değerlerinin karşılaştırılması.

İki farklı tip reçine karışımına ağırlıkça %10 cam elyaf takviyesi ile hazırlanmış olan 6 farklı test numunelerinin çekme uzama sonuçları değerlendirildiğinde en düşük çekme uzama %0,60 ile ortoftalik-tereftalik (OT+%10) en yüksek çekme uzama sonucu %0,93 ile tereftalik-vinilester (TV+%10) olduğu görülmektedir. Diğer hibriti karışımlar ise küçükten büyüğe doğru sırası ile %0,63 ile ortoftalik-izoftalik (OI+%10), %0,65 ile ortoftalik-vinilester (OV+%10), %0,71 ile tereftalik-izoftalik (TI+%10), %0,91 ile izoftalik-vinilester (IV+%10) olduğu bulunmuştur.

Üç tip reçine ile karışımı ile oluşturulan 4 adet hibrit reçineye %10 cam elyaf takviyesi ile güçlendirilmiş plakaların çekme uzama sonuçlarına göre en düşük değerler %0,65 ile ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%10) ve 0,66 ile ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV+%10) bulunmuştur. En yüksek çekme uzama sonucu ise %0,89 ile tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%10) olduğu görülmüştür. Ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV+%10) hibrit reçine sonucu ise %0,72 olarak bulunmuştur.

%10 cam elyaf takviye edilmiş ikili ve üçlü reçine karışımları ile üretilen hibrit reçinelerin çekme uzama sonuçlarına göre en yüksek çekme uzama değeri tereftalik-vinilester (TV+%10) hibrit reçineden oluşan karışımdan %0,93 olarak elde edilmiştir.

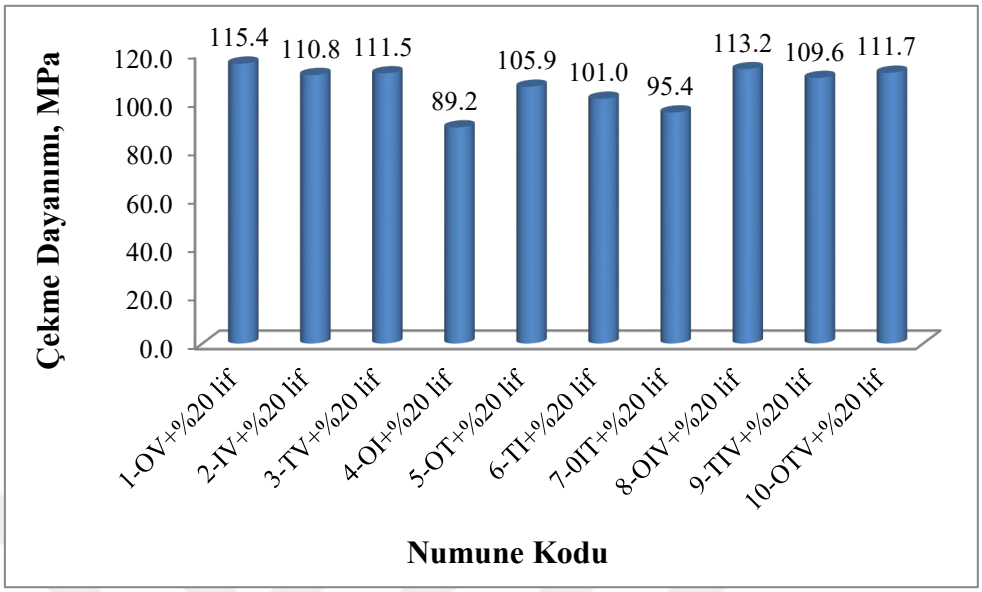
Hibrit reçinelere ağırlıkça %20 cam elyaf takviye edilerek üretilmiş numunelerin çekme test bulguları Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. %20 cam elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin çekme testi sonuçları.

NUMUNE KODU	**Çekme Modulü, MPa**	**Çekme Dayanımı, MPa**	**Çekme Uzaması %**
1-OV+%20 elyaf	7107	115,4	0,61
2-IV+%20 elyaf	6847	110,8	0,69
3-TV+%20 elyaf	6391	111,5	0,85
4-OI+%20 elyaf	6204	89,2	0,51
5-OT+%20 elyaf	6904	105,9	0,59
6-TI+%20 elyaf	6525	101,0	0,69
7-0IT+%20 elyaf	5785	95,4	0,63
8-OIV+%20 elyaf	7258	113,2	0,57
9-TIV+%20 elyaf	7146	109,6	0,80
10-OTV+%20 elyaf	7307	111,7	0,70

Ağırlıkça %20 oranında cam elyaf takviyesi Yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme dayanımı, çekme E modüllleri ve çekme uzama değerleri aşağıda değerlendirilmiştir.

İkili ve üçlü hibrit karışımlara ait ortalama çekme dayanımı sonuçları ve karşılaştırması Şekil 4.16'da verilmiştir



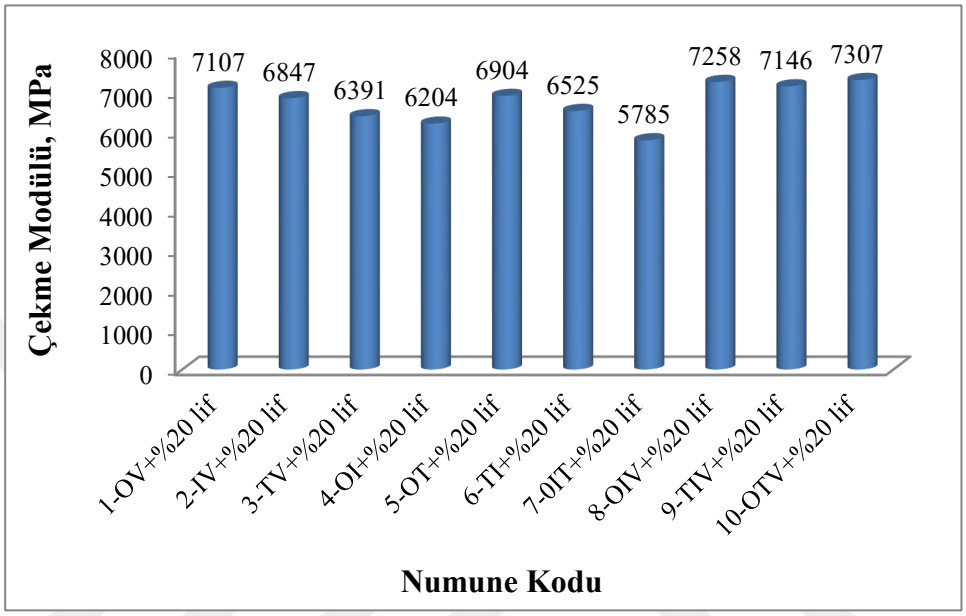
Şekil 4.16. Ağırlıkça %20 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.

İki farklı tip reçine ile yapılmış olan 6 adet hibrit reçine karışımının ağırlıkça %20 cam elyaf takviyesi ile hazırlanan numunelerinin çekme testi sonuçlarına göre; en düşük çekme dayanımı değeri ortoftalik-izoftalik (OI+%20) karışımından 89,2 MPa, en yüksek çekme dayanım değeri ortoftalik-vinilester (OV+%20) karışımından 115,4 MPa olarak bulunmuştur. Diğer dört numunenin sonucu ise şu şekilde sırlanamaktadır; tereftalik-izoftalik (TI+%20) 101 MPa, ortoftalik-tereftalik (OT+%10) 105,9 MPa, izoftalik-vinilester (IV+%20) 110,8 MPa ve tereftalik-vinilester (TV+%20) 111,5 MPa şeklinde artarak sıralanmaktadır.

Üç tip reçine ile karışımı ile oluşturulan dört adet hibrit reçineye ağırlıkça %20 cam elyaf takviyesi ile güçlendirilmiş plakaların çekme dayanım sonuçlarına göre; en düşük çekme dayanımı değeri 95,4 MPa ile ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%20), en yüksek çekme dayanım değeri ise 113,2 MPa ile ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV+%20) olarak bulunmuştur. Diğer iki hibrit karışımın sonuçları ise şu şekilde sıralanmaktadır; tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%20) 109,6 MPa ve ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV+%20) 111,7 MPa olarak elde edilmiştir.

%20 cam elyaf takviye edilmiş hibrit reçinelerin ikili ve üçlü karışımlarının çekme dayanım sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek çekme dayanımı ortoftalik-vinilester (OV+%20) reçineden oluşan karışımından 115,4 MPa olarak elde edilmiştir.

İkili ve üçlü hibrit karışımlara ait ortalama çekme E modulu sonuçları ve karşılaştırması Şekil 4.17'de verilmiştir



Şekil 4.17. Ağırlıkça %20 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme elastikiyet modülü değerlerinin karşılaştırılması.

Test sonuçlarına göre iki farklı tip reçine ile yapılmış olan altı adet hibrit reçine karışımının ağırlıkça %20 cam elyaf takviyesi ile hazırlanan numunelerden elde edilen en düşük çekme E modul değerine sahip karışımın 6204 MPa değeri ile ortoftalik-izoftalik (OI+%20) en yüksek çekme E modul değeri 7107 MPa ile ortoftalik-vinilester (OV+%20) olduğu bulunmuştur. Diğer sonuçlar ise küçükten büyüğe doğru şu şekilde sıralanmaktadır; 6391 MPa ile tereftalik-vinilester (TV+%20), 6525 MPa ile tereftalik-izoftalik (TI+%20), 6847 MPa ile izoftalik-vinilester (IV+%20) ve 6904 MPa ile ortoftalik-tereftalik (OT+%20) olduğu bulunmuştur.

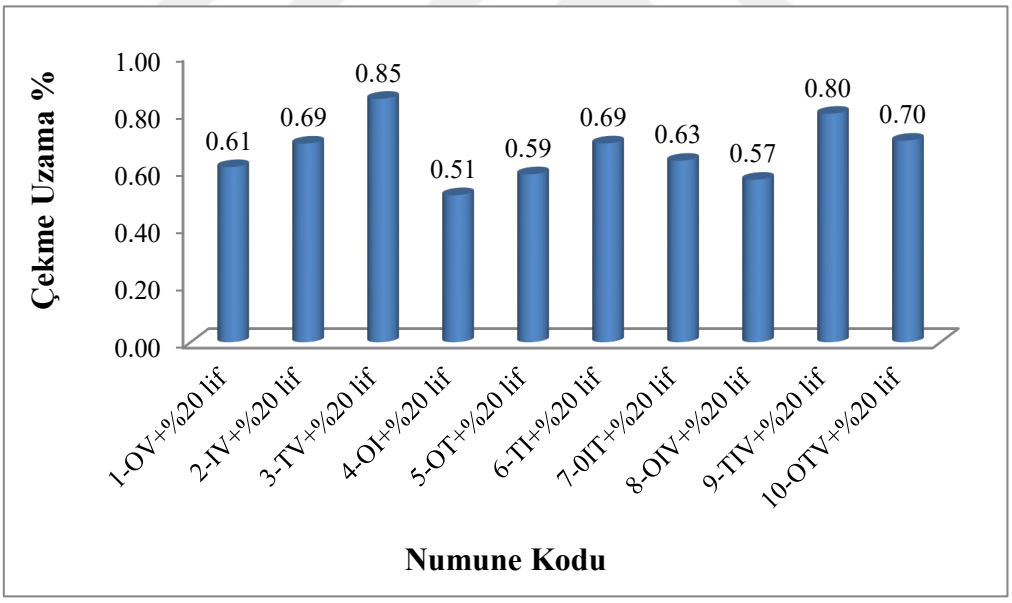
Üç tip reçine ile karışımı ile oluşturulan dört adet hibrit reçineye %20 cam elyaf takviyesi ile güçlendirilmiş plakaların çekme E modül sonuçlarına göre en düşük 5785 MPa değeri ile ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%20), en yüksek ise 7307 MPa ile ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV+%20) ile bu değere 7258 MPa ile çok yakın bir sonuç olan ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV+%10) olarak bulunmuştur. Tereftalik-

izoftalik-vinilester (TIV+%20) hibrti karışımın sonucu ise 7146 MPa olarak bulunmuştur.

%20 cam elyaf takviye edilmiş ikili ve üçlü reçine karışımları ile üretilen hibrit reçinelerin çekme E modül sonuçlarına göre en yüksek çekme E modül değeri 7307 MPa ile ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV+%20) karışımından elde edilmiştir.

Benzer şekilde Reddy ve ark, elyaf takviyesinin kompozitin mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmak için yapmış oldukları çalışmada çekme dayanımı ve çekme modülünün artan elyaf takviyesi ile yükseldiği sonucuna ulaşmışlardır [120]. Guermazi ve ark. da cam ve karbon elyafları ve epoksi matrisi ile hazırladıkları hibrit kompozitler üzerinde gerçekleştirdikleri mekanik testlerde elyaf içeriği artırıldığında Elastik müdülüsün artmasını açıkça gözlemiş ve bunun da karışımların kuralı kanunu gereği olduğunu vurgulamışlardır.

İkili ve üçlü hibrit karışımlara ait ortalama çekme uzama sonuçları ve karşılaştırması Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18. Ağırlıkça %20 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama çekme uzama değerlerinin karşılaştırılması.

Ağırlıkça %20 cam elyaf takviyesi ile hazırlanan iki farklı tip reçine ile yapılmış olan 6 adet hibrit reçine karışımın ile hazırlanan numunelerin çekme uzama sonuçları değerlendirildiğinde en duşuk çekme uzama değerine sahip takviyeli hibrit karışımın %0,51 ile ortoftalik-izoftalik (OV+%20) olduğu en yüksek ise %0,85 değer ile

tereftalik-vinilester (TV+%20) olduğu bulunmuştur. Diğer sonuçlar ise en düşükten en yükseğe doğru; %0,59 ile ortoftalik- tereftalik (OT+%20), %0,61 ile ortoftalik-vinilester (OV+%20), %0,69 ile izoftalik-vinilester (IV+%20) ve %0,69 ile tereftalik- izoftalik (TI+%20) şu şekilde sıralanmıştır.

Üç tip reçine ile karışımı ile oluşturulan dört adet hibrit reçineye %20 cam elyaf takviyesi ile güçlendirilmiş plakaların çekme uzama sonuçlarına göre en düşük değer %0,57 ile ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV+%20) en yüksek değer ise %0,80 ile tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%20) olarak bulunmuştur. Diğer iki %20 takviyeli hibrit reçine sonuçları ise; %0,63 ile ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%20) ve %0,70 ile ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV+%20) şekilde elde edilmiştir.

%20 cam elyaf takviye edilmiş ikili ve üçlü reçine karışımları ile üretilen hibrit reçinelerin çekme uzama sonuçlarına göre en yüksek çekme uzama değeri tereftalik-vinilester (TV+%20) hibrit reçineden oluşan karışımdan %0,85 olarak bulunmuştur.

Vinay ve ark.hazırladıkları polimer bazlı hibrit kompozitlerde sertlik ve çekme eğilme dayanımlarını yüksettiğini ve bu hususta elyafların martise dağılma ve yağışma karakteristiğini belirleyen kimyasal bağlayıcılar ile kaplanmasının etkili olduğunu vurgulamışlardır [112].

4.5. EĞİLME DAYANIMI TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

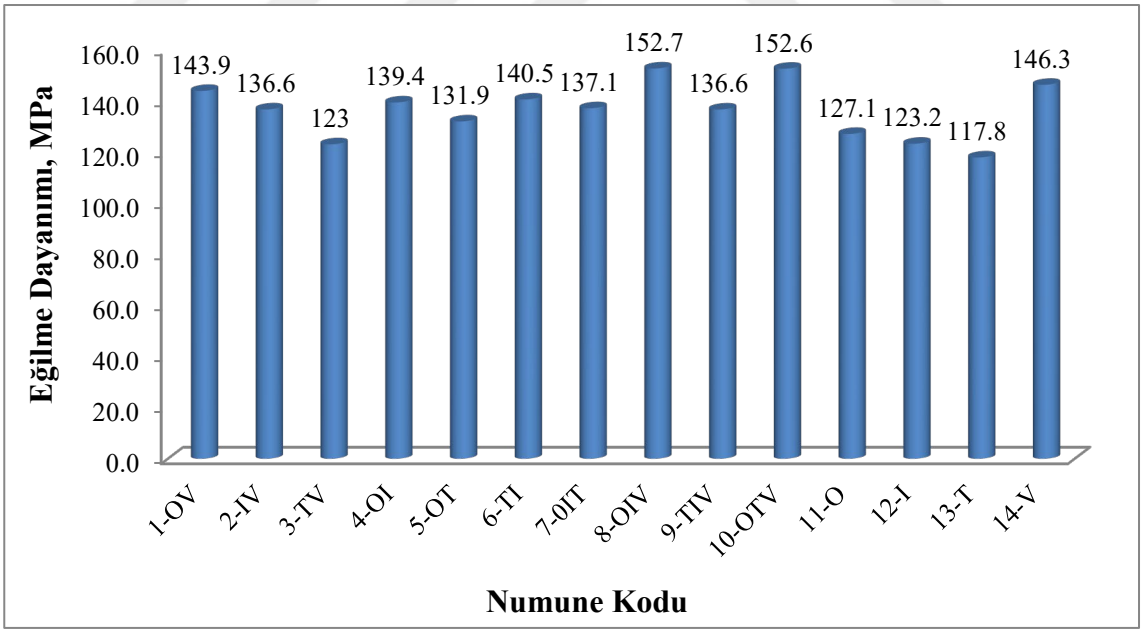
4.5.1. Reçine Karışımlarının Eğilme Test Sonuçları ve Değerlendirme

Bu çalışmada, farklı reçine türleri ve bu reçinelerin ağırlıkça eşit oranlarda hazırlanan hibrit karışımlarından üretilen plakalar üzerinde eğilme dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Bu reçine plakalarının eğilme dayanımı test sonuçları Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Farklı reçine türleri ve karışımlarının eğilme testi sonuçları.

Numune Kodu	Eğilme Modulü, MPa	Eğilme Dayanımı, MPa
1-OV	3461	143,9
2-IV	3261	136,6
3-TV	3295	123,0
4-OI	3507	139,4
5-OT	3428	131,9
6-TI	3426	140,5
7-0IT	3365	137,1
8-OIV	3348	152,7
9-TIV	3232	136,6
10-OTV	3503	152,6
11-O	3420	127,1
12-I	3110	123,2
13-T	3002	117,8
14-V	3501	146,3

Farklı reçine ve ikili ve üçlü hibrit karışımlara ait ortalama eğilme dayanımı sonuçları ve karşılaştırması Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19. Farklı reçine ve hibrit karışımlara ait ortalama eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.

Tek tip reçine ile yapılmış olan numunelerin eğilme dayanımı test sonuçları değerlendirildiğinde; en düşük eğilme dayanımı değeri tereftalik reçineden 117,8 MPa

olarak elde edilmiştir. En yüksek eğilme dayanımı değeri ise epoksi bazlı vinilester reçineden 146,3 MPa olarak elde edilmiştir. Ortoftalik ve izoftalik reçine ile yapılmış olan numunelerin eğilme dayanımı test sonuçları için ise 123,2 ile 127,1 MPa arasında değerler elde edilmiştir.

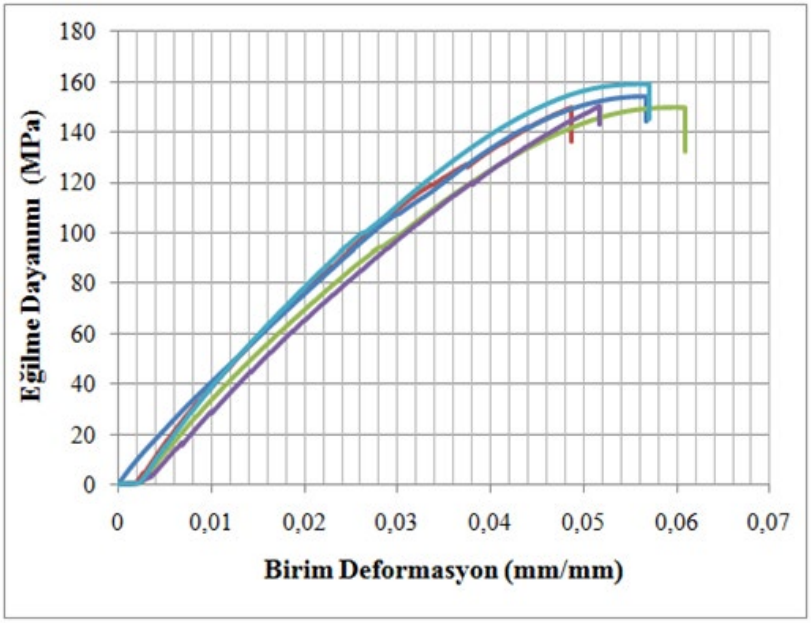
İki tip reçine ile yapılmış olan hibrit plakalardan hazırlanan numunelerin ortalama eğilme dayanımı test sonuçlarına göre; en düşük değeri tereftalik-vinilester (TV) reçine karışımından 123 MPa şeklinde elde edilmiştir. En yüksek eğilme dayanımı ise ortoftalik-vinilester (OV) reçine karışımından 143,9 MPa olarak bulunmuştur. Diğer hibrit karışımlar kıyaslandığında; eğilme dayanımı sonuçları düşükten yükseğe doğru sırasıyla ortoftalik-tereftalik (OT), izoftalik-vinilester (IV), ortoftalik-izoftalik (OI), ve son olarak tereftalik-izoftalik (TI) reçine numuneleri için; 131,9 MPa, 136,6 MPa, 139,4 MPa ve 140,5 MPa şeklinde elde edilmiştir. Ortalama eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde TI karışımından elde edilen değer içerdiği reçinelerin tek tip reçine ile yapılmış olan numunelerin eğilme dayanımı test sonucuna göre daha yüksek olduğu; izoftalik reçine ile kıyaslandığında %14 civarında, tereftalik reçine ile kıyaslandığında ise %19 civarında yüksek olduğu görülmüştür.

Üç tip reçine ile yapılmış olan hibrit numunelerin sonuçlarına göre; en düşük eğilme dayanımı değeri tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV) ve ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT) reçine karışımından sırasıyla 136,6 MPa ve 137,1 MPa şeklinde elde edilmiştir. En yüksek eğilme dayanımı ise ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV) ve ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV) reçine karışımından sırasıyla 152,7 MPa ve 152,6 MPa olarak elde edilmiştir. OTV hibrit reçinesinin eğilme dayanımı sonucu; ortoftalik, tereftalik ve vinilester reçinenin sonuçlarından sırasıyla %20, %30, %4 daha yüksek olduğu; OIV hibrit reçinesinin eğilme dayanımı sonucu; ortoftalik, izoftalik ve vinilester reçinenin sonuçlarından sırasıyla %20, %24, %4 daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tüm eğilme dayanımı test sonuçları değerlendirildiğinde; üçlü hibrit reçine karışımların sonuçlarından OTV ve OIV karışımları en yüksek dayanımı göstermiş olup; be değere en yakın olan OV hibrit reçine karışımına göre %7 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. OTV hibrit reçine karışımına ait eğilme dayanımı-birim deformasyon eğrisi Şekil 4.20'de gösterilmiştir.

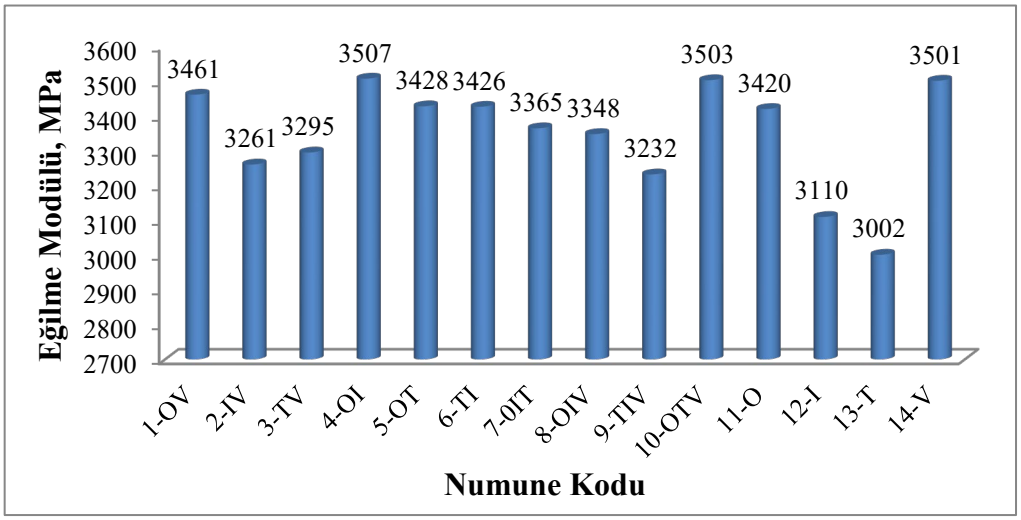
Gopinath A. ve ark. ürettikleri elyaf takviyeli epoksi ve polyester kompozitlerin mekanik testlerinden elde ettikleri gerilme-birim deformasyon eğrilerinde malzemelerin

kırılgan yapısından ötürü kırılma ve kopma dayanımı davranışının plastik deformasyon göstermediğini vurgulamışlardır [100].



Şekil 4.20. OTV reçine karışımına ait eğilme dayanımı-birim deformasyon eğrisi.

Farklı reçine ve ikili ve üçlü hibrit karışımlara ait ortalama eğilme modülü sonuçları ve karşılaştırması Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21. Farklı reçine ve hibrit karışımlara ait ortalama eğilme E modülü değerlerinin karşılaştırılması.

Eğilme elastikiyet modülü test sonuçları tek tip reçine ile yapılmış olan numune sonuçlarına göre; en düşük eğilme E modül tereftalik reçine 3002 MPa olarak, en

yüksek eğilme E modül değeri ise epoksi bazlı vinilester reçineden 3501 MPa olarak elde edilmiştir. Ortoftalik ve izoftalik reçine ile yapılmış test sonuçları sırası ile 3420 MPa ve 3110 MPa olarak bulunmuştur.

İki tip reçine ile yapılmış olan 6 adet hibrit plakalardan hazırlanan numunelerin eğilme E modülü sonuçlarına göre; en düşük çekme dayanımı değeri izoftalik-vinilester(IV) reçine karışımından 3261 MPa şeklinde elde edilmiştir. En yüksek eğilme E modülü değerleri ise ortoftalik-izoftalik (OI) reçine karışımından 3507 MPa ve ortoftalik-vinilester (OV) 3461 MPa olarak görülmüştür. Diğer 3 adet hibrit ikili karışım eğilme E modül sonucu kıyaslandığında; düşükten yükseğe doğru sırasıyla tereftalik-vinilester (TV) 3295 MPa, tereftalik-izoftalik (TI) 3426 MPa, ortoftalik-tereftalik (OT) 3428 MPa olarak bulunmuştur. Ortoftalik-izoftalik reçine karışımının eğilme E modul test sonucu karışımı oluşturan reçinelere kıyaslandığında ortoftaliğe göre %3, izoftaliğe göre %12 daha yüksek çıktığı görülmüştür.

Üç tip reçine ile yapılmış olan 4 adet hibrit plakalardan hazırlanan numunelerin eğilme E modülü test sonuçlarına göre; en düşük değeri tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV) reçine karışımından 3232 MPa olarak, en yüksek sonuç ise ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV) karışımından 3503 MPa olarak bulunmuştur. Diğer 2 adet hibrit karışımlar kıyaslandığında; çekme dayanımı sonuçları düşükten yükseğe doğru sırasıyla ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV), ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT) 3348 MPa ve 3365 MPa şeklinde elde edilmiştir. En yüksek eğilme E modülüne sahip ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV) hibrit karışımı E modulu; ortoftalik reçine sonucuna göre %3 ve izoftalik reçine sonucuna göre %16 daha yüksek ve vinilester reçine ile hemen hemen aynı çıkmıştır.

Eğilme E modülü sonuçları değerlendirildiğinde; reçinelerin hibrit karışımları ile bulunan test sonuçları reçinelerin tek başına kullanıldığı duruma göre değişkenlik gösterdiği görülmüştür. En yüksek eğilme E modül değeri ortoftalik-izoftalik (OI) reçine karışımından elde edilmiştir.

4.5.2. Cam Elyaflı Kompozitlerin Eğilme Test Sonuçları ve Değerlendirme

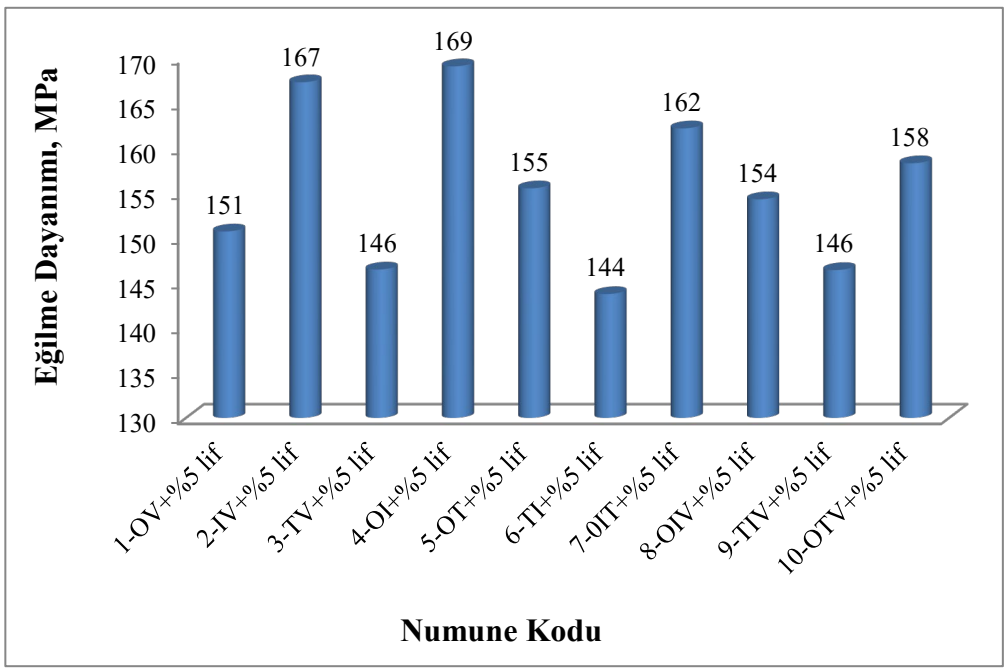
Hibrit reçinelere ağırlıkça %5 cam elyaf takviye edilerek üretilmiş numunelerin eğilme test bulguları

Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. %5 cam elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin eğilme testi sonuçları.

NUMUNE KODU	Eğilme Modulü, MPa	Eğilme Dayanımı, MPa	Eğilme Uzaması %
1-OV+%5 elyaf	4235	151	1,78
2-IV+%5 elyaf	3625	167	2,51
3-TV+%5 elyaf	3546	146	1,94
4-OI+%5 elyaf	3865	169	2,44
5-OT+%5 elyaf	4087	155	2,00
6-TI+%5 elyaf	3917	144	1,40
7-OIT+%5 elyaf	3722	162	2,24
8-OIV+%5 elyaf	3629	154	1,64
9-TIV+%5 elyaf	3760	146	1,90
10-OTV+%5 elyaf	3629	158	1,66

Ağırlıkça %5 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama eğilme dayanımı ve eğilme E modülleri sırasıyla Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'de verilmiştir. İkili ve üçlü hibrit karışımlara ait ortalama eğilme dayanımı sonuçları ve karşılaştırması Şekil 4.22'de verilmiştir.



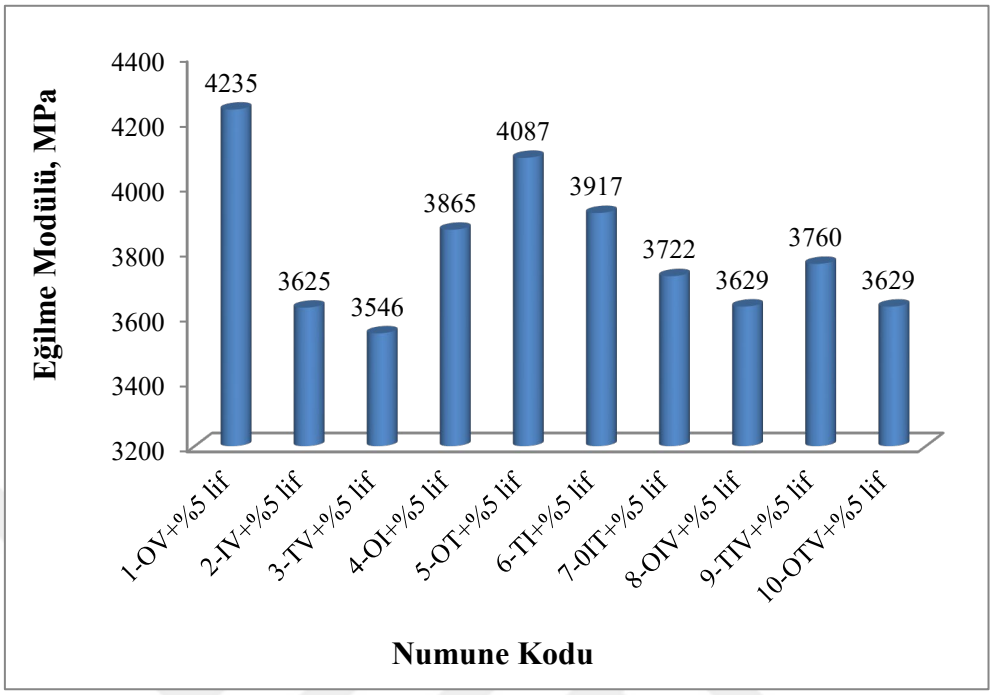
Şekil 4.22. Ağırlıkça %5 oranında cam elyaf takviyesi Yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.

Ağırlıkça %5 cam elyaf takviyesi ile hazırlanmış ikili hibrit reçine karışımı eğilme dayanım sonuçlarına göre; en düşük eğilme dayanımı 144 MPa ile tereftalik-izoftalik (TI+%5) karışımından elde edilmiştir, en yüksek eğilme dayanımı değeri ise 169 MPa ile ortoftalik-izoftalik (OI+%5) hibrit karışımından bulunmuştur. Diğer hibrit karışımların eğilme dayanım test sonuçlarına düşükten yükseğe doğru sırası ile bakıldığında 146 MPa sonucu ile tereftalik-vinilester (TV%5), 151 MPa sonucu ile ortoftalik- vinilester (OV%5), 155 MPa sonucu ile ortoftalik-tereftalik (OT+%5) ve 167 MPa sonucu ile izoftalik-vinilester (IV+%5) olduğu görülmektedir.

Üç tip reçine ile karışımı ile elde edilen 4 adet hibrit reçineye %5 cam elyaf takviyesi ile güçlendirilmiş plakaların eğilme dayanım sonuçlarına göre en düşük değer 146 MPa değeri ile tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%5) karışımından, en yüksek değer ise 162 MPa değer ile ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%5) karışımından elde edilmiştir. Diğer üçlü hibrit reçine karışımları eğilme dayanım sonucuna göre; 154 MPa sonucu ile ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV+%5) ve 158 MPa ile ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV+%5) şeklinde sıralanmıştır.

%5 cam elyaf takviye edilmiş ikili ve üçlü reçine karışımları ile üretilen hibrit reçinelerin eğilme dayanım sonuçlarına göre en yüksek eğilme dayanım değeri ortoftalik-izoftalik (OI+%5) hibrit reçineden oluşan karışımdan 169 MPa olarak elde edilmiştir.

İkili ve üçlü hibrit karışımlara ait ortalama eğilme modulüs sonuçları ve karşılaştırması Şekil 4.23'de verilmiştir.



Şekil 4.23. Ağırlıkça %5 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama eğilme elastikiyet modülü değerlerinin karşılaştırılması.

Ağırlıkça %5 cam elyaf takviyesi ile hazırlanmış ikili hibrit reçine karışımlarının eğilme E modul sonuçlarına göre; en düşük eğilme E modulu 3546 MPa ile tereftalik-vinilester (TV%5) en yüksek eğilme E modulu ise 4235 MPa değeri ortoftalik-vinilester (OV%5) reçine karışımından bulunmuştur. Diğer hibrit karışımların eğilme dayanım test sonuçlarına küçükten büyüğe doğru sırası ile bakıldığında izoftalik- vinilester (IV+%5) 3625 MPa, ortoftalik-izoftalik (OI+%5) 3865 MPa, tereftalik-izoftalik (TI+%5) 3917 MPa, ortoftalik-tereftalik (OT+%5) 4087 MPa olarak bulunmuştur.

Üç tip reçine ile karışımı ile elde edilen 4 adet hibrit reçineye %5 cam elyaf takviyesi ile güçlendirilmiş plakaların eğilme E modülü sonuçlarına göre en düşük değer 3629 MPa ile ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV+%5) hibrit karışımından, en yükse değer ise 3760 MPa değer ile tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%5) hibrit reçine karışımından elde edilmiştir. Diğer iki hibrit karışımın eğilme E modul sonucu küçükten büyüğe doğru sıralandığında 3629 MPa değeri ile ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV+%5), 3722 MPa değeri ile ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%5) karışımlarından oluşmaktadır.

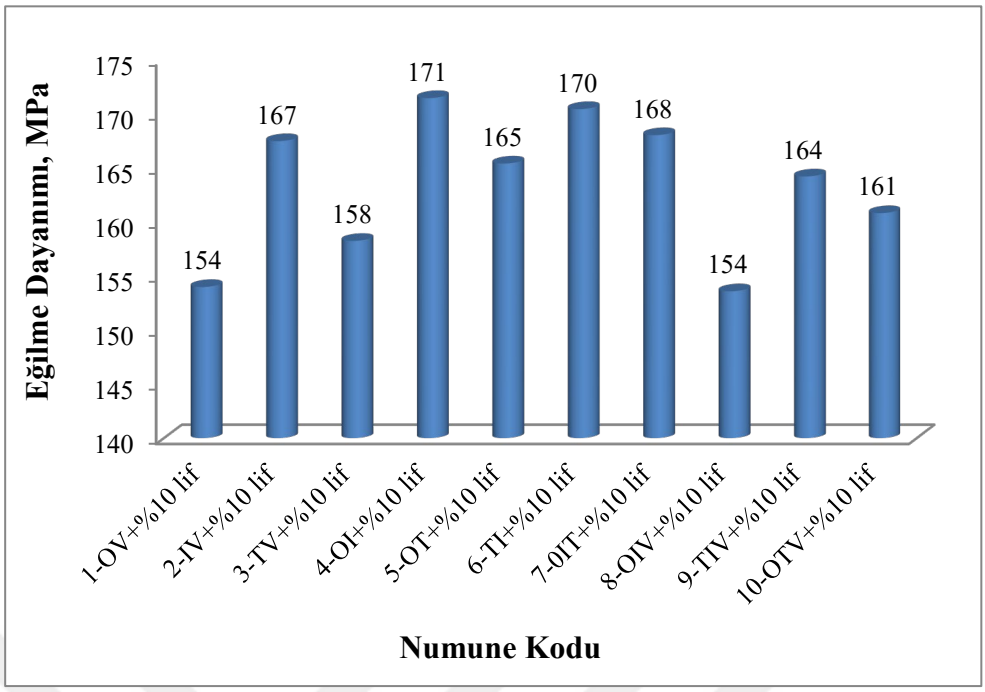
%5 cam elyaf takviye edilmiş ikili ve üçlü reçine karışımları ile üretilen hibrit reçinelerin eğilme E modül sonuçlarına göre en yüksek eğilme dayanım değeri 4235 MPa değeri ortoftalik-vinilester (OV%5) reçine karışımından bulunmuştur.

Hibrit reçinelere ağırlıkça %10 cam elyaf takviye edilerek üretilmiş numunelerin eğilme test bulguları Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. %10 cam elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin eğilme testi sonuçları.

NUMUNE KODU	**Eğilme Modülü, MPa**	**Eğilme Dayanımı, MPa**	**Eğilme Uzaması %**
1-OV+%10 elyaf	4634	154	1,66
2-IV+%10 elyaf	3617	167	2,35
3-TV+%10 elyaf	4016	158	1,92
4-OI+%10 elyaf	4154	171	2,23
5-OT+%10 elyaf	4075	165	2,23
6-TI+%10 elyaf	4136	170	2,26
7-0IT+%10 elyaf	4528	168	2,04
8-OIV+%10 elyaf	4197	154	1,86
9-TIV+%10 elyaf	3811	164	2,22
10-OTV+%10 elyaf	4494	161	1,74

Ağırlıkca %10 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama eğilme dayanımı ve eğilme E modülü değerleri sırasıyla Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te verilmiştir.

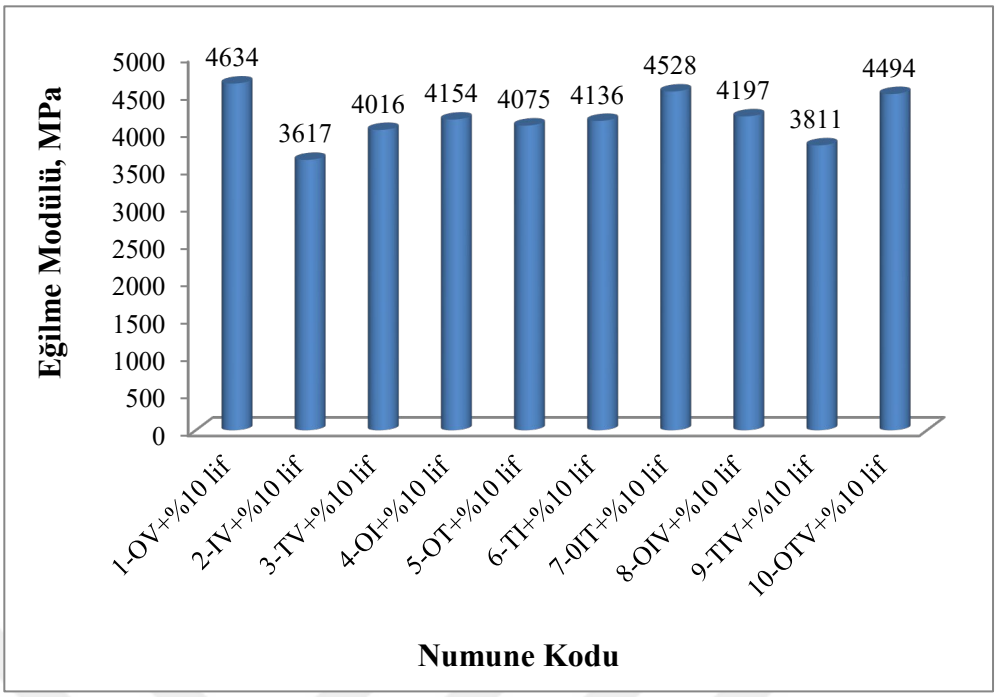


Şekil 4.24. Ağırlıkça %10 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.

İki farklı tip reçine karışımına ağırlıkça %10 cam elyaf takviyesi ile hazırlanmış olan 6 farklı test numunelerinin eğilme dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde en düşük eğilme dayanımı 154 MPa ile ortoftalik-vinilester (OV+%10), en yüksek eğilme dayanımı 171 MPa ile ortoftalik-izoftalik (OI+%10) olarak bulunmuştur. Diğer hibrit karışımlar küçükten büyüğe doğru sırası ile ile 158 MPa ile tereftalik-vinilester (TV+%10), 165 MPa ile ortoftalik-tereftalik (OT+%10), 167 MPa ile izoftalik-vinilester (IV+%10), 170 MPa tereftalik-izoftalik (TI+%10) olarak bulunmuştur.

Üç tip reçine ile karışımı ile elde edilen dört hibrit reçineye %10 cam elyaf takviyesi ile güçlendirilmiş plakaların eğilme dayanım sonuçlarına göre en düşük değer 154 MPa ile ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV+%10) en yüksek değer ise 168 MPa ile ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%10) olduğu görülmüştür. Diğer iki hibrti reçinenin %10 cam elyaf takviyesi sonucu eğme dayanımı test sonuçlarına bakıldığında ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV+%10) 161 MPa, tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%5) 164 MPa olarak bulunmuştur.

%10 cam elyaf takviye edilmiş ikili ve üçlü reçine karışımları ile üretilmiş takviyeli hibrit reçinelerin eğilme dayanım sonuçlarına göre en yüksek eğilme dayanım değeri ortoftalik-izoftalik (OI+%10) hibrit reçineden oluşan karışımdan 171 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.25. Ağırlıkça %10 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama eğilme elastikiyet modülü değerlerinin karşılaştırılması.

İki farklı tip reçine karışımına ağırlıkça %10 cam elyaf takviyesi ile hazırlanmış olan 6 farklı test numunelerinin eğilme E modulu sonuçları değerlendirildiğinde en düşük eğilme dayanımı 3617 MPa ile izoftalik-vinilester (IV+%10), en yüksek eğilme E modulu 4634 MPa ile ortoftalik-vinilester (OV+%10) olduğu görülmektedir. Diğer hibrit karışımlar küçükten büyüğe doğru sırası ile 4016 MPa ile tereftalik-vinilester (TV+%10), 4075 MPa ile ortoftalik-tereftalik (OT+%10), 4136 MPa ile tereftalik-izoftalik (TI+%10), 4154 MPa ile ortoftalik-izoftalik (OI+%10) olduğu bulunmuştur.

Üç tip reçine ile karışımı ile elde edilen dört hibrit reçineye %10 cam elyaf takviyesi ile güçlendirilmiş plakaların eğilme E modulüs sonuçlarına göre en düşük değer 3811 MPa ile tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%10), en yüksek değer 4528 MPa ile ortaftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%5) için olarak bulunmuştur. Diğer iki hibrit reçinenin eğilme E modulleri ise ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV+%10) için 4197 MPa, ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV+%10) için ise 4494 MPa olarak bulunmuştur.

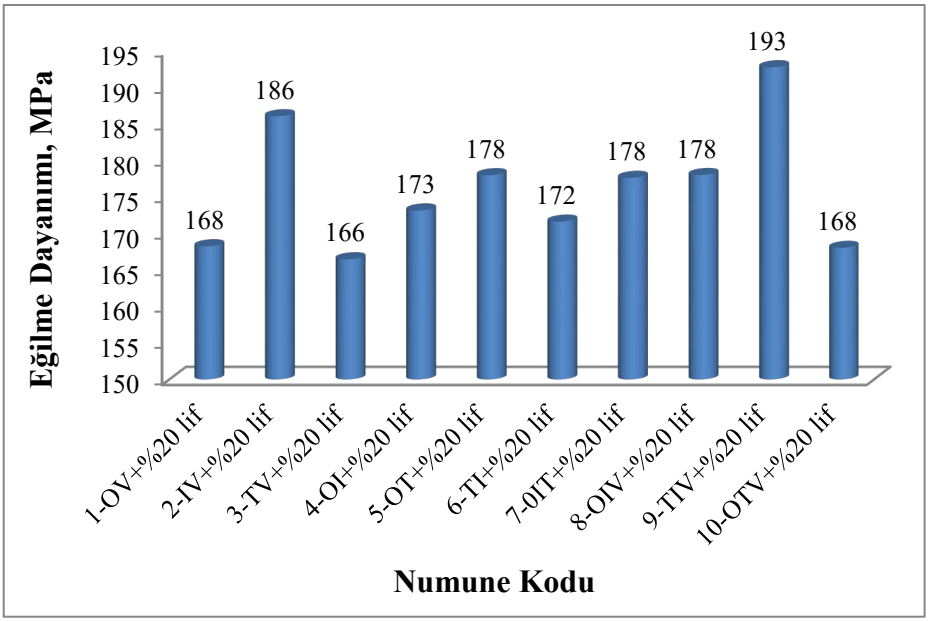
%10 cam elyaf takviye edilmiş ikili ve üçlü reçine karışımları ile üretilmiş takviyeli hibrit reçinelerin eğilme E modül sonuçlarına göre en yüksek eğilme E modül değeri ortoftalik-vinilester (OV+%10) hibrit reçineden oluşan karışımdan 4634 MPa olarak elde edilmiştir.

Hibrit reçinelere ağırlıkça %20 cam elyaf takviye edilerek üretilmiş numunelerin eğilme test bulguları Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10. %20 cam elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin eğilme testi sonuçları.

NUMUNE KODU	Eğilme Modülü, MPa	Eğilme Dayanımı, MPa	Eğilme Uzaması %
1-OV+%20 elyaf	4772	168	2,80
2-IV+%20 elyaf	4387	186	2,67
3-TV+%20 elyaf	4802	166	2,10
4-OI+%20 elyaf	4728	173	2,06
5-OT+%20 elyaf	4638	178	2,28
6-TI+%20 elyaf	5051	172	2,50
7-0IT+%20 elyaf	4629	178	2,92
8-OIV+%20 elyaf	4727	178	2,59
9-TIV+%20 elyaf	5294	193	2,85
10-OTV+%20 elyaf	4735	168	2,29

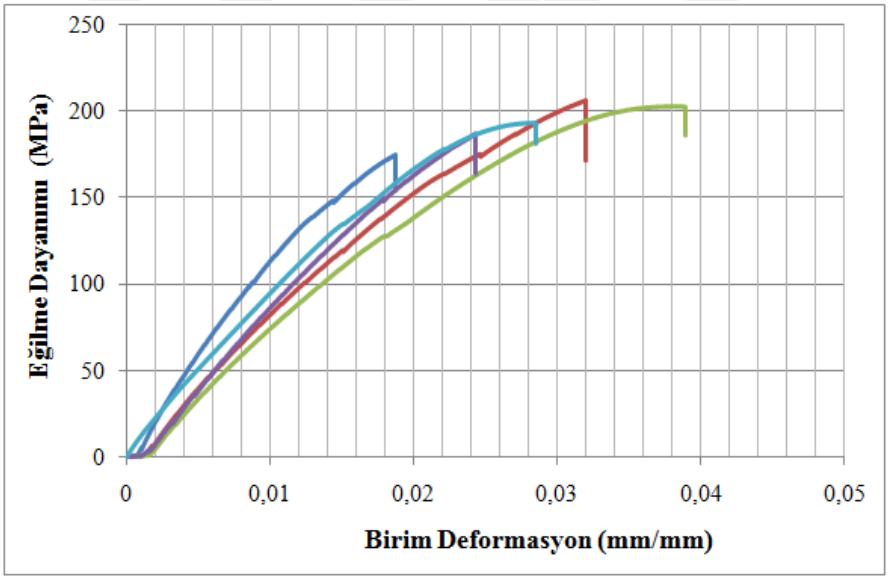
Ağırlıkça %20 oranında cam elyaf takviyesi Yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama eğilme dayanımı ve eğilme E modüllleri değerleri sırasıyla Şekil 4.26 ve Şekil 4.28'de verilmiştir.



Şekil 4.26. Ağırlıkça %20 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması.

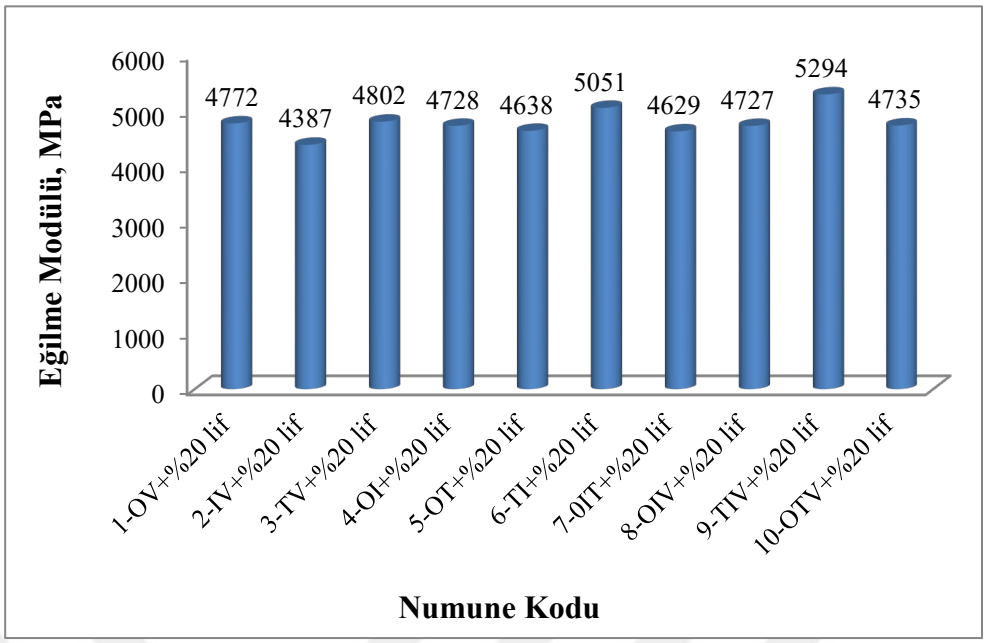
Ağırlıkça %20 cam elyaf takviyesi ile hazırlanmış ikili hibrit reçine karışımı eğilme dayanım sonuçlarına göre; en düşük eğilme dayanımı 166 MPa ile tereftalik-vinilester (TV%20), en yüksek eğilme dayanımı değeri ise 186 MPa ile izoftalik-vinilester (IV+%20) hibrit karışımından bulunmuştur. Diğer hibrit karışımların eğilme dayanım test sonuçlarına küçükten büyüğe doğru 168 MPa ile ortoftalik- vinilester (OV%20), 172 MPa ile tereftalik-izoftalik (TI%20), 173 MPa ile ortoftalik-izoftalik (OI%20) ve 178 MPa ile ortoftalik- tereftalik (OT+%20) şeklinde sıralanmaktadır.

Üç tip reçine ile karışımı ile elde edilen dört adet hibrit reçineye %20 cam elyaf takviyesi ile güçlendirilmiş plakaların eğilme dayanım sonuçlarına göre en düşük değer 168 MPa değeri ile ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV+%20) en yüksek değer ise 193 MPa ile tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%20) olarak bulunmuştur. (TIV+%20) hibrit kompozitine ait eğilme dayanımı-birim deformasyon eğrisi Şekil 4.27'de verilmiştir. Ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV+%20) ve ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%20) her iki %20 takviyeli hibrit reçinelerin eğilme dayanım sonuçları 178 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 4.27. TIV+%20 hibrit kompoziti eğilme dayanımı-birim deformasyon eğrisi.

Sonuçlara genel olarak bakıldığında %20 cam elyaf takviye edilmiş ikili ve üçlü reçine karışımları ile üretilen hibrit reçinelerin eğilme dayanım sonuçlarına göre en yüksek eğilme dayanım değeri tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%20) hibrit karışımdan 193 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.28. Ağırlıkça %20 oranında cam elyaf takviyesi yapılmış hibrit karışımlarına ait ortalama eğilme elastikiyet modülü değerlerinin karşılaştırılması.

İki farklı tip reçine karışımına ağırlıkça %20 cam elyaf takviyesi ile hazırlanmış olan altı farklı test numunelerinin eğilme E modulu sonuçları değerlendirildiğinde en düşük eğilme dayanımı 4387 MPa ile izoftalik-vinilester (IV+%20) en yüksek eğilme dayanım değeri ise 5051 MPa ile tereftalik-izoftalik (TI+%20) olarak bulunmuştur. Diğer hibrit karışımlar küçükten büyüğe doğru sırası ile 4638 MPa ile ortoftalik-tereftalik (OT+%20), 4728 MPa ile ortoftalik-izoftalik (OI+%20), 4772 MPa ile ortoftalik-vinilester (OV+%20) ve 4802 MPa ile tereftalik-vinilester (TV+%20) olarak bulunmuştur.

Üç tip reçine ile karışımı ile elde edilen dört hibrit reçineye %20 cam elyaf takviyesi ile güçlendirilmiş plakaların eğilme E modül sonuçlarına göre en düşük değer 4629 MPa ile ortaftalik-izoftalik-tereftalik (OIT+%20), en yüksek değer 5294 MPa ile tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%20)'den elde edilmiştir. Diğer hibrit reçineler ise sırası ile 4727 MPa ve 4735 MPa şeklinde ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV+%20) ve ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV+%20) olacak şekilde bulunmuştur.

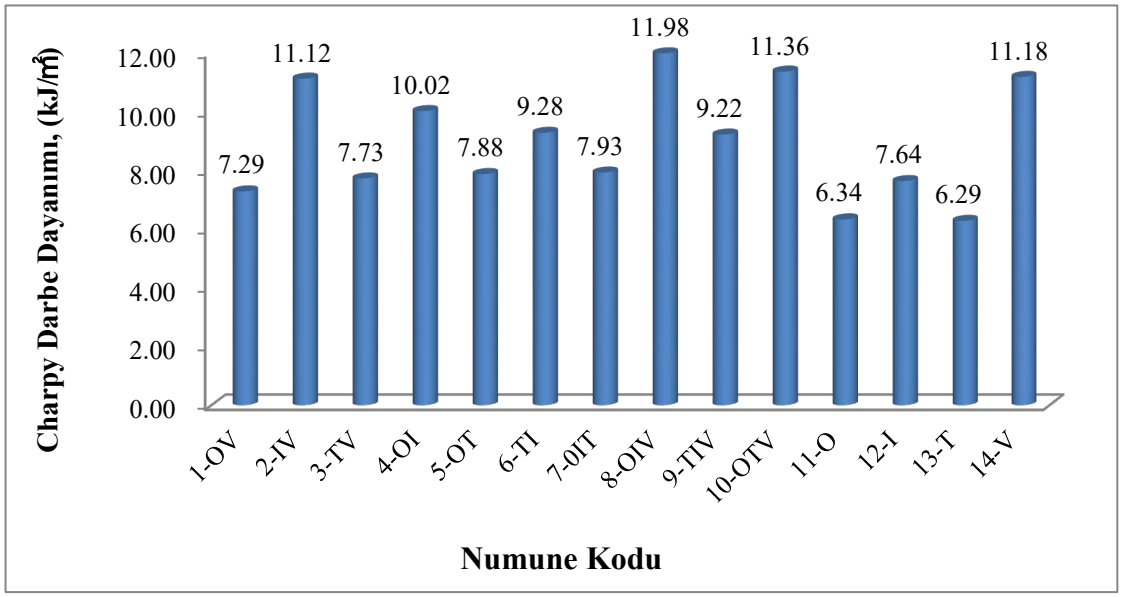
Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde %20 cam elyaf takviye edilmiş ikili ve üçlü reçine karışımları ile üretilmiş takviyeli hibrit reçinelerin eğilme E modül sonuçlarına göre en yüksek eğilme E modül değeri 5294 MPa ile tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV+%20) olduğu bulunmuştur.

4.6. CHARPY DARBE TESTİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Farklı reçine ve hibrit karışımlardan elde edilen charpy darbe enerjisi ve darbe dayanımı değerleri Çizelge 4.11 ve Şekil 4.29'da verilmiştir.

Çizelge 4.11. Farklı reçine türleri ve karışımlarının charpy darbe enerjisi değerleri.

Numune Kodu	Charpy Darbe Dayanımı (kJ/m^2)
1-OV	7,29
2-IV	11,12
3-TV	7,73
4-OI	10,02
5-OT	7,88
6-TI	9,28
7-0IT	7,93
8-OIV	11,98
9-TIV	9,22
10-OTV	11,36
11-O	6,34
12-I	7,64
13-T	6,29
14-V	11,18



Şekil 4.29. Farklı reçine ve hibrit karışımlarına ait ortalama charpy darbe enerjisi değerlerinin karşılaştırılması.

Tek tip reçine ile yapılmış olan numunelerin Charpy darbe test sonuçlarına göre; en düşük darbe dayanımı değeri 6,29 kJ/m^2 ile tereftalik, en yüksek darbe dayanımı değeri 11,18 kJ/m^2 ile epoksi bazlı vinilester reçineden elde edilmiştir. Ortoftalik reçine charpy test sonucu 6,34 kJ/m^2 olarak tereftalik ile çok yakın olduğu görülmüştür. İzoftalik reçine charpy dayanım değeri 7,64 kJ/m^2 olarak bulunmuştur. Tek tip reçinelerde en yüksek sonuç vinilester reçinede elde edilmiştir.

İki tip reçine ile yapılmış olan 6 adet hibrit plakalardan hazırlanan numunelerin charpy dayanım testi sonucuna göre; en düşük sonuç 7,29 kJ/m^2 ile ortoftalik-vinilester (OV), en yüksek sonuç ise 11,12 kJ/m^2 ile izoftalik-vinilester (IV) hibrit karışımından elde edilmiştir. Diğer ikili hibrit karışımlar en düşük değerden yükseğe doğru elde edilen test sonuçlarının; tereftalik-vinilester (TV) 7,73 kJ/m^2, ortoftalik-tereftalik (OV) 7,88 kJ/m^2, tereftalik-izoftalik (TI) 9,28 kJ/m^2 ve ortoftalik-izoftalik (OI) 9,28 kJ/m^2 şeklinde sıralandığı görülmüştür.

En yüksek charpy dayanım sonucu izoftalik-vinilester (IV) karışımından 11,12 kJ/m^2 olarak elde edilmiştir. Bu sonuç izoftalik reçinenin tek başına 7,64 kJ/m^2, vinilester reçineninde 11,18 kJ/m^2 bulunduğu düşünüldüğünde farklı reçinelerin karışımları ile üretilen plakların charpy dayanım testi sonuçlarına göre hibrit karışım reçinelerin tek başına durumları ile karşileştırıldığında charpy dayanım değerlerinin değiştiği sonucu çıkarılabilir.

Üç tip reçine ile yapılmış olan 4 adet hibrit plakalardan hazırlanan numunelerin charpy darbe dayanım testine göre en düşük sonuç 7,93 kJ/m^2 ile ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT), en yüksek sonuç ise 11,98 kJ/m^2 ile ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV) hibrit reçinelerinden elde edilmiştir. Diğer iki hibrit reçine charpy dayanımı ise tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV) için 9,22 kJ/m^2 ve ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV) için ise 11,36 kJ/m^2 olarak bulunmuştur.

Charpy dayanım testi sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, farklı reçine türleri, ikili ve üçlü hibrit karışımlar ile toplamda 14 farklı test yapılmış olup en yüksek iki değerin 11,98 kJ/m^2 ve 11,36 kJ/m^2 ile sırası ile (OIV) ve (OTV) üçlü hibrit karışımlarda olduğu ve içeriğindeki her bir reçinenin bireysel charpy test sonucuna göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. Şöyle ki; dört adet üçlü reçine hibrit karışımın charpy dayanım test sonuçlarının ortalaması 10.12 kJ/m^2, altı adet ikili reçine hibrit karışımın charpy dayanım test sonuçlarının ortalaması 8,89 kJ/m^2, reçinelerin tek başına

durumlarında ise charpy dayanım test sonuçlarının ortalaması 7,86 kJ/m^2 olarak tespit edilmiştir.

Gümülcine ve ark., el yatırması tekniğini kullanarak hazırladıkları izoftalik doymamış polyesterli, E-camı takviyeli kompozitler üzerinde darbe testleri yaparak; elyaf takviyesinin türü ve miktarına göre darbe dayanımı performansında farklılıklar olduğunu tespit etmişlerdir [118].

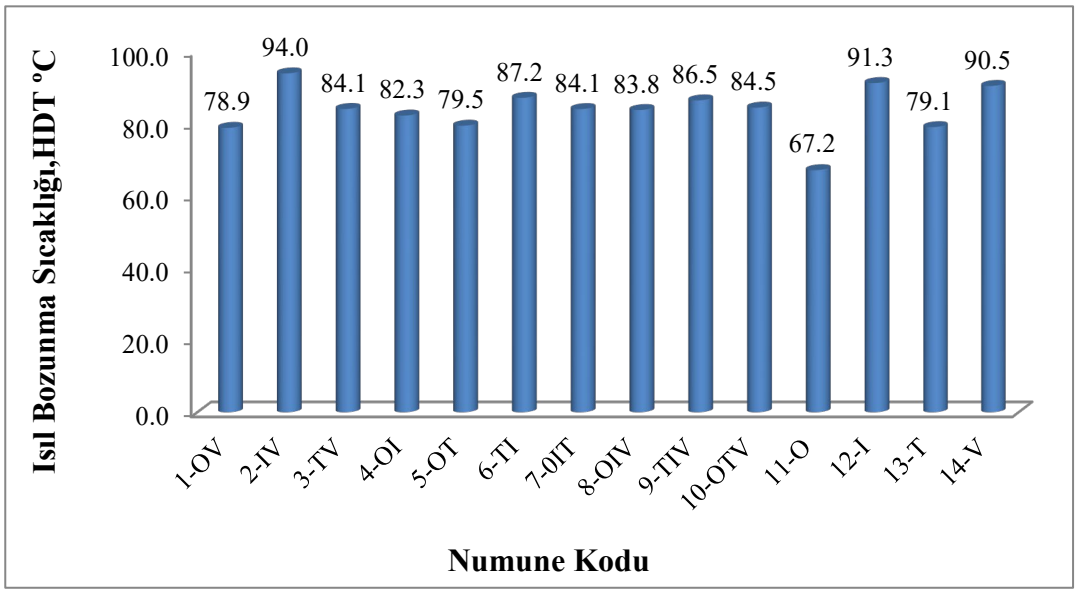
4.7. HDT TESTİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Farklı reçine ve hibrit karışımlardan elde edilen ısıl bozunma sıcaklığı (HDT) değerleri Çizelge 4.12 ve Şekil 4.30'da verilmiştir.

Tek tip reçine ile yapılmış olan numunelerin HDT testi sonuçlarına göre en düşük değer 67,2 °C ile ortoftalik reçinede, en yüksek değer ise 91,3 °C izoftalik reçinede olduğu görülmektedir. Diğer iki reçinenin sonuçları ise sırası ile vinilester reçine için 90,5 °C ve tereftalik reçinenin 79,1 °C olduğu bulunmuştur.

Çizelge 4.12. Farklı reçine türleri ve karışımlarının HDT değerleri.

Numune Kodu	**Isıl Bozunma Sıcaklığı (HDT) ºC**
1-OV	78,9
2-IV	94,0
3-TV	84,1
4-OI	82,3
5-OT	79,5
6-TI	87,2
7-0IT	84,1
8-OIV	83,8
9-TIV	86,5
10-OTV	84,5
11-O	67,2
12-I	91,3
13-T	79,1
14-V	90,5



Şekil 4.30. Reçine ve hibrit karışımlarına ait ortalama ısıl bozunma sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

İki tip reçine ile yapılmış olan 6 adet hibrit plakalardan hazırlanan numunelerin HDT testi sonucuna göre en düşük değer 78,9 °C ile ortoftalik-vinilester (OV) hibrit reçinesinde en yüksek değer ise 94 °C ile izoftalik-vinilester (IV) hibrit reçinesinde bulunmuştur. Diğer ikili karışımlı hibrit reçineler düşükten yükseğe doğru sıraladığımızda ise; 79,5 °C ile ortoftalik- tereftalik (OT), 82,3 °C ile ortoftalik-izoftalik (OI), 84,1 °C ile tereftalik-vinilester (TV) ve 87,2 °C ile tereftalik- izoftalik (TI) olarak bulunmuştur.

İkili hibrit karışımlarda HDT testinde en yüksek değer 94 °C ile izoftalik-vinilester (IV) de bulunmuştur, bu karışımı oluşturan reçineler için 91,3 °C ile izoftalik ve 90,5 °C vinilester olduğunu düşünüldüğünde hibrit reçinede karış bileşenlerine göre daha yüksek HDT değerine ulaşılmıştır.

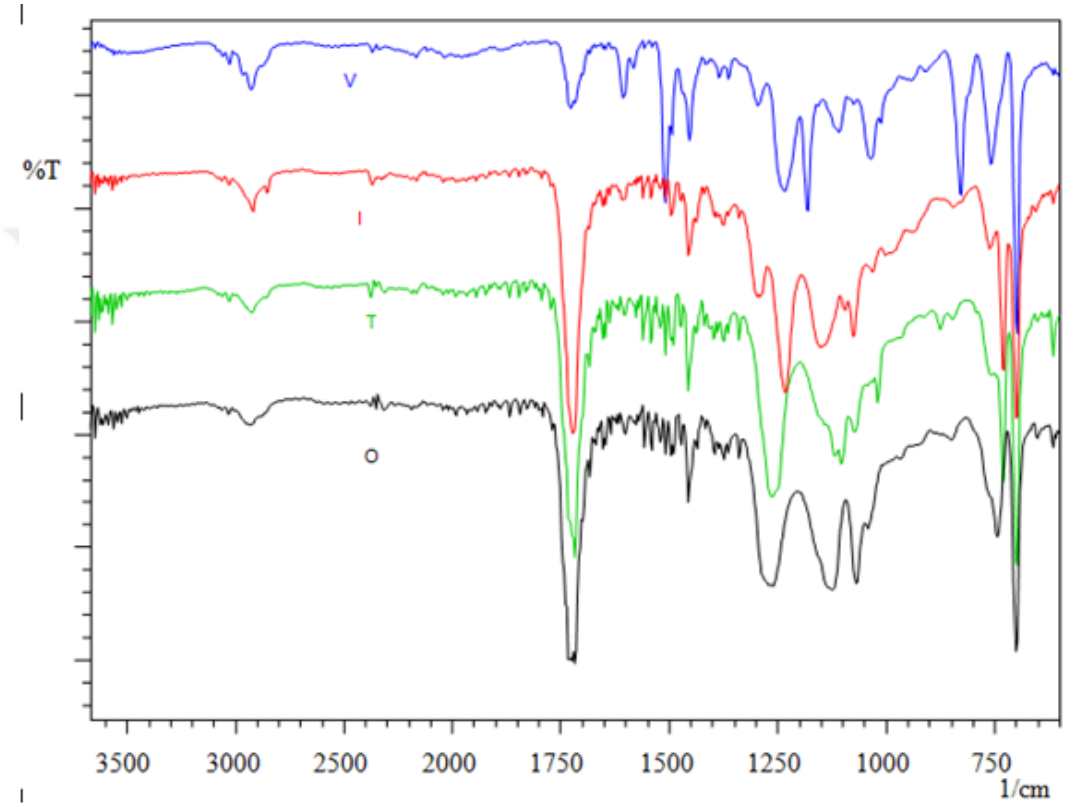
Üç tip reçine ile yapılmış olan 4 adet hibrit plakalardan hazırlanan numunelerin HDT testlerinde sonuçlar 83,8 °C ile 86,5 °C arasında ve birbirine çok yakın çıktığı görülmektedir. Sonuçları en düşükten yükseğe sıraladığımızda; ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV) karışımında 83,8 °C, ortoftalik-izoftalik- tereftalik (OIT) karışımında 84,1 °C, ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV) karışımında 84,5 °C ve tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV) karışımında ise 86,5 °C olarak bulunmuştur.

HDT testi sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde ikili ve üçlü karışımlı hibrit reçineler için kendi karışımı oluşturan reçinenin HDT değerine göre farklı sonuçlar elde

edildiği görülmüştür. En yüksek HDT değeri izoftalik-vinilester (IV) hibrit reçinesinde elde edilmiştir.

4.8. FT-IR SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

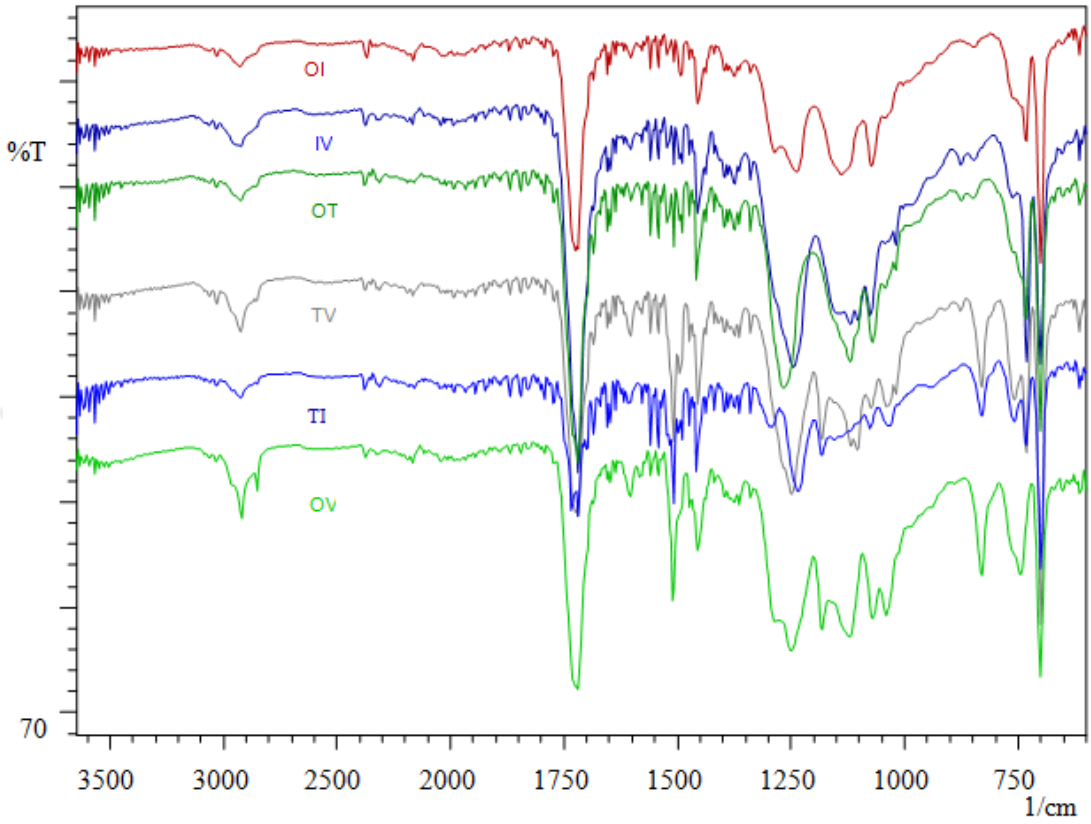
Ham reçinelerin her biri için ve bunların ikili, üçlü hibrit reçine karışımlarının FT-IR analizlerine ait spektrumlar Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te verilmiştir.



Şekil 4.31. Reçinelerin FT-IR sonuçları.

Doymamış ham polyester reçinelere ait spektrumlar incelendiğinde ortoftalik, tereftalik ve vinilester reçine numunesi için; ftalik esterlere ait karbonil grubundaki C=O asimetrik gerilme titreşimi 1716 cm^{-1} 'de gözlenirken, izoftalik reçine için bu titreşim 1718 cm^{-1} 'de gözlenmiştir. C-O simetrik gerilme titreşimi ise ortoftalik reçine için 1122 cm^{-1} 'de, tereftalik reçine için ise belirgin bir şekilde belirgin bir şekilde 1116 cm^{-1} 'de gözlenmiştir. Bu değerler izoftalik ve vinilester reçineden elde edilen kompozitte daha düşük dalga sayılarında gözlenmiştir. Vinilester reçine için hem ftalik asit molekülünde bulunan hem de stiren molekülünde bulunan ve aromatik halkaya ait C=C gerilmesi titreşimi 1508 cm^{-1} de gözlenmiştir. CH_2 bantlarına ait pikler ortoftalik, izoftalik ve tereftalik reçine numunesi için 1456 cm^{-1}'de gözlenirken vinilester reçine

için bu titreşim 1454 cm^{-1} 'de gözlenmiştir. Polimerleşme sonrasında bu bandın şiddetinde artma gözlenmiştir. Bu artış, yapıdaki karbon zincirinin uzunluğunun arttığı anlamına gelmektedir [138].

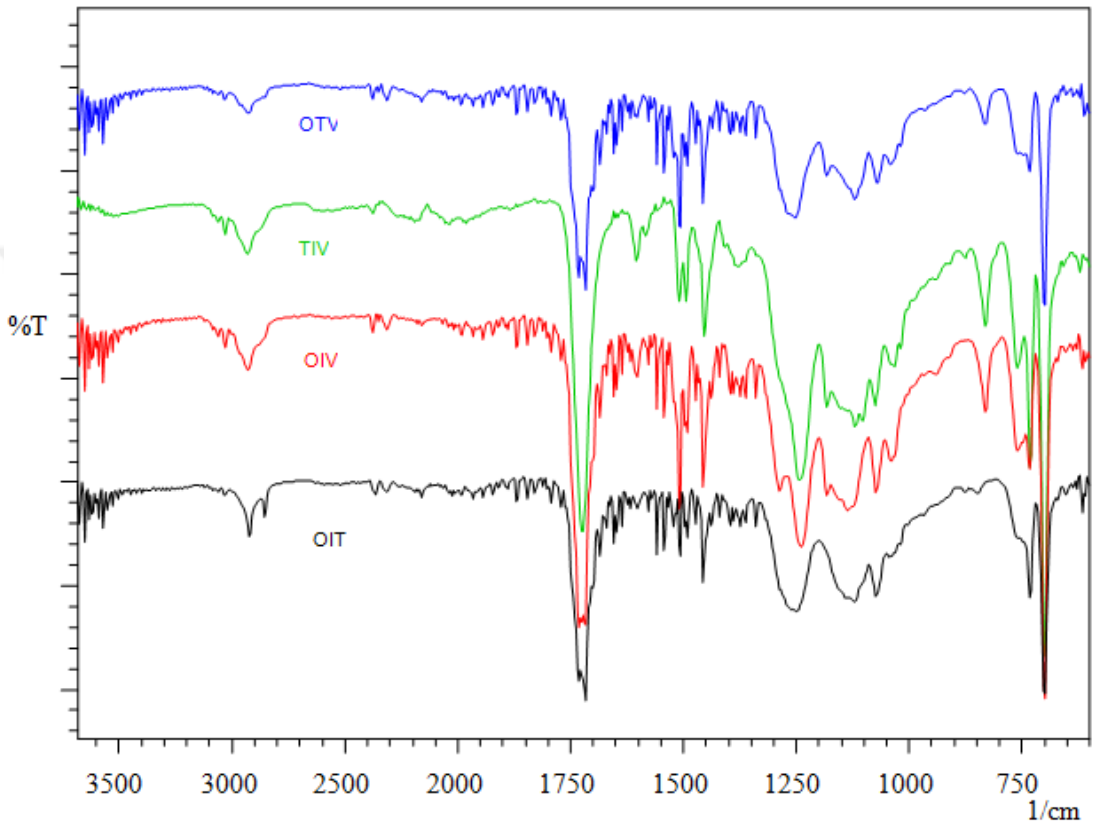


Şekil 4.32. İkili reçine karışımlarından üretilen hibrit reçinelerin FT-IR sonuçları.

OV, IV, TV, OI, OT, TI iki bileşenli hibrit reçine karışımlarından ile elde edilen IR spektrumları incelenmesi sonrasında ftalik esterlere ait karbonil grubundaki C=O asimetrik gerilme titreşimi OV, TV, OT reçineler için 1716 cm^{-1} 'de gözlenirken, OV reçine için bu titreşim 1718 cm^{-1} 'de gözlenmiştir. Bu bölgede OI ve TI gruplarının C=O gerilmelerinin diğerleri ile aralarında minimal farklılıklar görülmüştür. OI ve TI reçine karışımlarına ait spektrumlarda sırasıyla 1722 cm^{-1} ve 1720 cm^{-1} 'de karbonil grubuna ait C=O etkileşimleri gözlenmiştir. Karbonil gruplarına ait C-O gerilme titreşimleri ise, OV, OT ve TI reçine için 1118 ile 1120 cm-1 bandında gözlenmiştir. 2900-3050 cm-1 de gözlenen titreşimler C-H asimetrik ve gerilme titreşimlerine ait olmaktadır. Polimerleşme reaksiyonunda önemli bir pik olan ve polimerizasyon karakterini belirleyen stirene ait karakteristik C=C titreşimi elde edilen kompozitte sırasıyla 914 cm^{-1} ve 912 cm^{-1}'de gözlenmesi gerekirken polimerizasyondan dolayı ortadan kalktığı görülmektedir. Bu piklerin olmaması aynı zamanda polimerleşme

reaksiyonunun ikili karışımlar için de gerçekleştiğini göstermektedir. CH_2 gruplarına ait eğilme titreşimleri ise 1456 cm^{-1}' de gözlenmiştir. Yapılardaki aromatik halkadan kaynaklı C-C etkileşimleri ise OV, TV ve IV reçine karışımlarına ait spektrumlarda 1508 cm^{-1} de gözlenmiştir.

Numune grafikleri üst üste çakıştırıldığında ise, minimal kaymalar ile birlikte, hibrit reçine karışımlarının farklı geçirgenlik değerlerine sahip oldukları gözlenmektedir.



Şekil 4.33. Üçlü reçine karışımlarından üretilen hibrit reçinelerin FT-IR sonuçları.

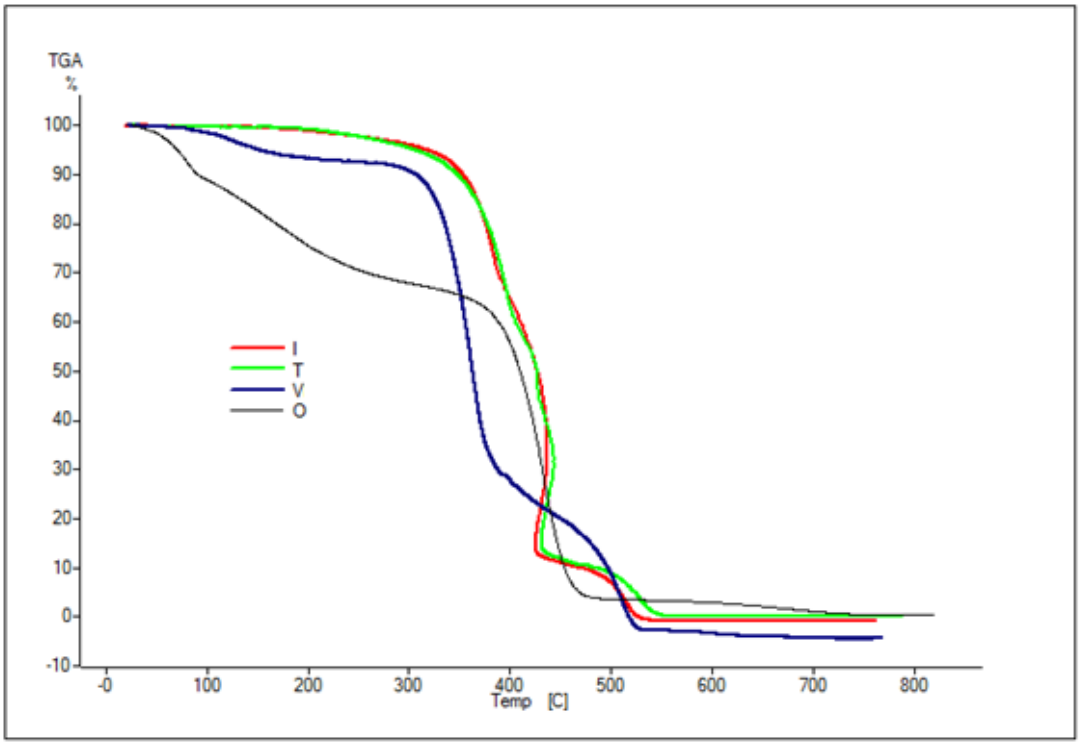
OIT, OIV, TIV, OTV üç bileşenli hibrit reçine karışımlarından ile elde edilen IR spektrumları incelenmesi sonrasında TIV ve OTV karışımları için 1725 cm^{-1} karbonil grubuna ait C=O etkileşimleri gözlenmiştir. Bu bölgede OIT ve OIV karışımlarının C=O gerilmelerinin diğerleri ile aralarında minimal farklılıklar görülmüştür. Karbonil gruplarına ait C-O gerilme titreşimleri ise, 1118 cm^{-1} ile 1120 cm^{-1} bandında gözlenmiştir. 2918 cm^{-1}-3050 cm^{-1} de gözlenen yoğun titreşimler C-H asimetrik ve gerilme titreşimlerine aittir. 1243 cm^{-1}'de gözlenen ileve tepe noktaları, epoksi halkasının açılması sırasında oluşturulan eter bağlantilerına karşılık gelmektedir. Polimerleşme reaksiyonunda önemli bir pik olan ve polimerizasyon karakterini belirleyen stirene ait karakteristik C=C titreşimi sırasıyla 914 cm^{-1} ve 912 cm^{-1}'de

gözlenmesi gerekirken, bu üçlü hibrit reçine karışımlarında polimerizasyondan dolayı ortadan kalkmıştır. Bu piklerin olmaması bu üçlü hibrit reçine karışımlarında aynı zamanda polimerleşme reaksiyonunun gerçekleştiğini ifade etmektedir. CH_2 gruplarına ait eğilme titreşimleri ise OTV reçinelerine ait spektrumlarda 1456 cm^{-1}'de gözlenmiştir. Fakat TIV karışımına ait titreşim değerleri daha düşük dalga sayısı olan 1452 cm^{-1}'de gözlenmiştir. Tüm üçlü hibrit yapilerdaki aromatik halkadan kaynaklı C-C etkileşimleri ise 1508 cm^{-1}'de gözlenmiştir.

Arrieta, Richaud, Fayolle, Nizeyimana yaptıkları çalışmada stiren ile kürlenmiş vinilester veya doymamış polyesterlerden yapılan termoset reçinelerin plakalarının ısıl oksidasyonu çeşitli sıcaklıklarda ve oksijen basınçlarında inceleyerek yaptıkları FTIR ölçümlerinde, bu çalışmadakine benzer olarak ester grubunun pozisyonunda CH_2 oksidasyonundan gelen bir anhidrit olduğu sonucuna varilen bir karbonil ürünlerinin birikimini göstermişlerdir. FT-IR analizlerinde benzer şekilde 1730 cm^{-1} bandında yer alan esterleri, aromatik ve alifatik C-H bağlarının uzamasının yer aldığı bandı ve C-O gruplarının sebep olduğu geniş absorbansları tespit etmişlerdir [123].

4.9. TGA TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

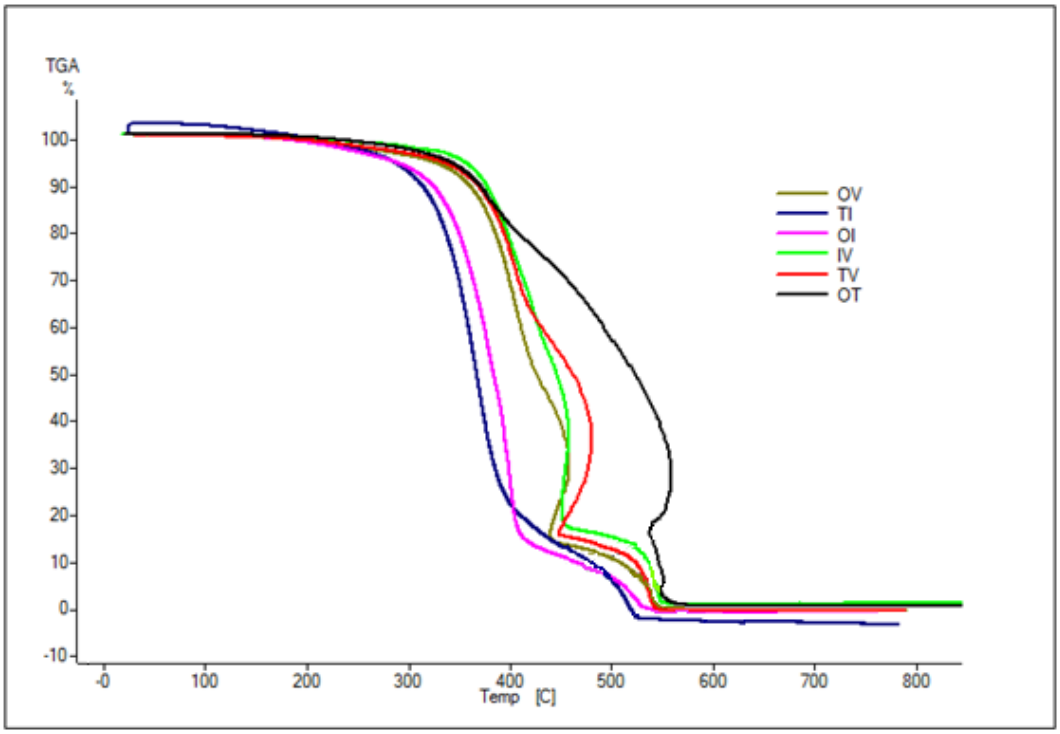
Reçine, ikili, üçlü hibrit reçineleri karışımlarının TGA test sonuçları ile sıcaklığa bağlı kütle kaybı belirlenerek bu grafikler Şekil 4.34, Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da verilmiştir. Tüm numunelerin bozunma sıcaklıklarının iki aşamada olduğu görülmüş ve bunlar; 25 ^{0}C-250 °C ve 250 °C-550 °C aralığında incelenmiştir. 25 °C ve 250 °C bölgesinde düşük molekül ağırlıklı moleküller ve çözücü olarak kullanılan stiren miktarının yapıdan uzaklaşırken, 250 °C-550 °C bölgesinde orta molekül ağırlıklı moleküller ve katı madde olarak adlandırilen polimer yapıdan uzaklaşmaktadır. Bu sıcaklık aralığı, ana yapının bozulduğu sıcaklık aralığını kapsamaktadır.



Şekil 4.34. Reçinelerin TGA sonuçları.

Reçinelerin TGA analizi incelendiğinde; izoftalik, tereftalik ve vinilester reçinelerin bozunma eğrilerinin birbirine yakın özeliklere sahip olduğu görülmüştür. Ancak ortoftalik reçinenin bozunma eğrisi farklı davranış göstermiştir. Ortoftalik reçine numunesinin termal kararlılık eğrisi beklenilenden farklı olarak erken bozunma sergilemiştir. Bu reçine numunesi hazırlanırken diğer numunelere kıyasla daha düşük kürleşme dereceleri söz konusu olabilir ve kürleşme sağlayamayan bazı bileşenler yapının içerisinde kalarak erken bozulmaya sebep olmuş olabilir.

Reçine türleri karşileştırıldığında, hem birinci bölgede hem de ikinci bölgede, izoftalik ve tereftalik reçine numunelerinin termal karalılığının ortoftalik ve vinilester reçineden elde edilen reçine numunelerine göre daha yüksek değerde olduğu gözlenmiştir. Bu bölgede %95,162 oranında kütle kaybına uğrayan vinilester yapısının termal kararlılığının diğer yapılara oranla daha düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 4.35. İkili reçine karışımlarından üretilen hibrit reçinelerin TGA sonuçları.

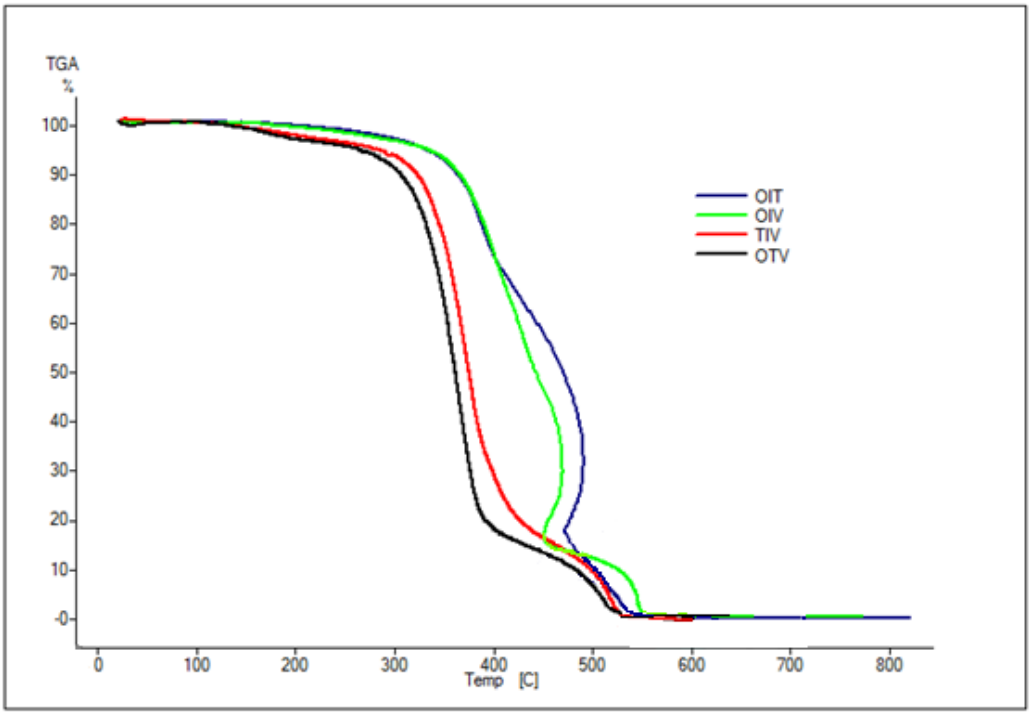
İkili reçine karışımlarından hazırlanan hibrit reçinelerin sıcaklığa bağlı kütle kayıpları incelendiğinde; polimerlerdeki suyun ve düşük molekül ağırlıklı grupların yapıdan uzaklaşmasından kaynaklanan kütle kaybı ile ana yapının bozunmasından kaynaklanan kütle kaybı olarak iki aşamada gerçekleştiği görülmüştür. Ortoftalik, izoftalik, tereftalik reçinelerin vinilester reçine ile ikili karışımlarının bozunmaların daha ayrıntılı bir şekilde analizi ise Çizelge 4.13'te verilmiştir.

Çizelge 4.13. Hibrit reçinelerin sıcaklığa bağlı kütle kaybı miktarları.

	Kütle Kaybı (%)	
Numune Kodu	**25-250 (°C) aralığında**	**250-550 (°C) aralığında**
OV	2,764	98,22
IV	1,834	98,08
TV	2,064	97,899
V	7,4	95,162

İlk bölüm olan 25 °C ve 250 °C bölgesinde OV, IV ve TV yapileri incelendiğinde ise su muhtevası ya da düşük molekül ağırlıklı yapileın bulunma miktarının daha az seviyede olduğu görülmüştür. 250 °C-550 °C olan ikinci bölümde ise, karışımların ana yapılarını

da oluşturan kısımların bulunduğu bölgelerdir. Büyük kütle kayıpları bu aşamada gerçekleşmiştir. Aynı zamanda bu aralık hibrit reçine karışımlarının termal kararlılığı hakkında da bilgi vermektedir. Bu bölgede IV karışımının ise diğer gruplara oranla termal kararlılığının daha yüksek oranda olduğu görülmüştür. Bu bölgede, IV karışımının %98,22 oranında kütle kaybına uğradığı belirlenmiştir. Ayrıca ftalik asit bazlı reçinelerden elde edilen reçinelerin genel olarak, tek tip vinilester reçineden elde edilen kompozite oranla daha yüksek termal kararlılığa sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 4.36. Üçlü reçine karışımlarından üretilen hibrit reçinelerin TGA sonuçları.

Üçlü reçine karışımlarından hazırlanan hibrit reçinelerin sıcaklığa bağlı kütle kayıpları incelendiğinde; burada da polimerlerdeki suyun ve düşük molekül ağırlıklı grupların yapıdan uzaklaşmasından kaynaklanan kütle kaybı ile ana yapının bozunmasından kaynaklanan kütle kaybı olarak iki aşamada gerçekleştiği görülmüştür.

Birinci bölümde, OIT ve OIV hibrit karışımında düşük molekül ağırlıklı grupların daha yüksek oranda bulunduğu belirlenmiştir. OTV ve TIV yapileri incelendiğinde ise su muhtevası ya da düşük molekül ağırlıklı yapileın bulunma miktarının daha az seviyede olduğu görülmüştür.

İkinci bölüm ise, kompozitlerin ana yapılarını da oluşturan kısımların bulunduğu ve kütle kayıplarının olduğu kısımdır. Bu bölgede OIT ve OIV yapısının termal kararlılığının diğer yapılara oranla daha düşük olduğu görülmüştür. Bu bölgede OTV

kompoziti %90 civarında kütle kaybına uğradığı belirlenmiştir. Ayrıca ftalik asit bazlı reçinelerden elde edilen kompozitlerin genel olarak, OTV reçineden elde edilen kompozite oranla daha yüksek termal kararlılığa sahip olduğu görülmüştür.

Benzer şekilde Dave ve ark. polyester ve vinil ester reçine karışımları üzerinde gerçekleştirdikleri TGA analizlerinde bozunma hızının sıcaklıkla arttığını ve 400 ºC ve 550 ºC arasında en hızlı olduğunu tespit etmişlerdir [97].

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada doymamış polyester reçineler (ortoftalik, izoftalik, tereftalik) ve epoksi bazlı vinilester reçine olmak üzere dört farklı reçinenin hibrit kompinayonları üç aşamada değerlendirilmiştir.

İlk aşamada doymamış polyester reçinelerin herbirinin epoksi reçine ile iki tabakalı plakları üretilerek arayüzey yapışması SEM görüntüleri alınarak morfolojik olarak incelenmiştir.

İkinci aşamada bu dört farklı tipteki reçienelerin ikili ve üçlü hibrit karışımlarının on farklı kombinasyonu üretilerek ham reçine mekanik özellikleri ile karşileştirilerak kimyasal ve termal analizleri yapılmıştır.

Üçüncü ve son aşamada ise üretilen bu on farklı hibrit reçine karışımlarına ağırlıkça %5, %10 ve %20 oranlarında E tipi cam elyafı takviyesi ile kompozit hibrit plaklar üretilmiş ve levhaların mekanik testleri yapılmıştır. Elyaf takviyeli hibrit reçine karışımlarınının mekanik özellikleri kendi içinde elyaf oranına bağlı olarak ve elyaf takviyesiz olan karışımlara göre kıyaslamasına bakılmıştır. Mekanik testlerden elde edilen veriler kimyasal ve termal analizlerde elde edilen veriler ile harmanlanarak aşağıda sonuçlar özetlenmiştir.

Doymamış polyester reçine ile epoksi bazlı vinilester reçine ara yüz incelenmesi

Karışımların kuralına dayanan tahminler, yapıda boşluk olması, elyaf-rmatris arayüz dayanımı, elyafların yönü ve dağılımı gibi faktörler nedeniyle yanlış olabilmektedir. Kısa kırpılmış cam elyafların reçineye karıştırılması esnasında oluşabilecek hava tutucu boşluklar, elyafların rasgele yönlendirilmesi ve zayıf elyaf matris arayüzeyleri gibi kusurların, kompozitin genel mekanik özellikleri üzerinde zararlı etkisi vardır. Tüm iki tabakalı reçine plakalarının ara yüzeylerine dik olarak alınan SEM görüntüleri incelendiğinde, matris yapının homojen olduğu, içerisinde safsızlık ve hava kabarcığı vs. herhangi bir boşluklu yapı oluşumunun olmadığı görülmektedir. SEM görüntülerinin tam orta paralel ekseninde yer alan; özellikle iki reçine tipinin yapıştığı numune plaka ara yüzeylerinde yeterince homojen ve aynı şekilde boşluk bulunmayacak şekilde bir yapışma sağlandığı ve bu çalışma kapsamında yapılan mekanik testleri etkileyebilecek zararlı etkiler oluşturmadığı görülmüştür.

Fiziksel Testler ve Barcol Sertlik Testleri

Doymamış polyester ve bisfenol A epoksi bazlı vinilester reçinelerin tamamen birbirine karıştırılmak suretiyle farklı kombinasyondaki ikili ve üçlü hibrit karışımları hazırlanarak üzerinde gerçekleştirilen fiziksel test sonuçları incelendiğinde, hibrit karışımlarda elde edilen jelleşme sıcaklıklarının büyük değişiklik göstermediği ve beklenen sıcaklık değerlerinde jelleşmeye başladığı tespit edilmiştir. Ayrıca tüm reçine ve bunların hibrit karışımlarının pik ekzoterm sıcaklığı değerlerinin 180 °C ile 190 °C arasında elde edildiği ve bununla birlikte Barcol Sertlik değerleri ile birlikte değerlendirildiğinde tüm karışımların yeterli kürleşmeyi sağlandığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar, hibrit reçine karışımları için yüksek HDT sonuçlarını da doğrulayarak moleküller arası aderansın ve çapraz bağlanmanın istenilen seviyede elde edildiğini göstermektedir. Bu sonuçlar reçinenin sertleştirme işleminin hem kinetiği hem de termodinamiği, daha sonra reçinenin mekanik özelliklerini etkileyen nihai çapraz bağ mikroyapı ağının oluşumunda önemli bir rol oydığını teyit etmektedir.

Cam elyaf takviyesiz ve takviyeli hibrit reçinelerin mekanik test verilerinin ham reçinelerin mekanik özellikleri ile karşılaştırılması

Çekme Dayanımı Testi

Farklı tipteki reçinelerin karıştırılması ile oluşturulan hibrit reçineler ve karışımı oluşturan ham reçine bileşenleri üzerinde yapılan çekme dayanımı sonuçları birbirinden farklı elde edilmiştir. Ortoftalik (O), izoftalik (I), tereftalik (T) ve epoksi bazlı vinilester (V) ham reçinelerin çekme dayanımı değerleri sırasıyla O:72,2 MPa, I:74,6 MPa, T:72 MPa ve V:77 MPa olarak bulunmuştur. Karışımsız yapılan ham reçine çekme dayanım testlerinde en yüksek sonuç vinilester reçine için 77 MPa olarak bulunmuş iken; hazırlanan tüm hibrit reçine karışımları arasında en yüksek sonuç ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV) reçinede 80 MPa olarak olarak bulunmuş olup; ham reçine bileşenleri ile kıyaslandığında vinilester (V)'ye göre %3,9, tereftalik (T) ve ortoftalik reçineye göre %11 daha yüksek bulunmuştur.

Hazırlanan tüm hibrit reçine karışımları arasında en düşük sonuç ise; ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT) reçinede 71,1 MPa olarak bulunmuş olup; ham reçine bileşenleri ile kıyaslandığında izoftalik (I)'ya göre %1,3, tereftalik (T)'ye göre %4,9 daha düşük bulunmuştur.

İki bileşenli hibrit karışımlar arasında en yüksek çekme dayanımı TI : 77,2 MPa olarak ham reçine T ve I ile kıyasla sırasıyla %7,2 ve %3,5 daha yüksek olduğu görülmüştür.

Hazırlanan ham reçine çekme E modülü kıyaslandığında; Ortoftalik (O), izoftalik (I), tereftalik (T) ve epoksi bazlı vinilester (V) ham reçineler için sırasıyla O:3396 MPa, I:3625 MPa, T:3445 MPa ve V:3481 MPa olarak bulunmuştur.

Hazırlanan tüm hibrit reçine karışımları içerisinde en yüksek çekme E modülü tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV) hibrit reçine için 3719 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu çekme E modülü TIV hibrit karışımının içeriğinde yer alan ham reçine bileşenlerinin çekme E modulu değerlerinden I'ya göre %2,6, V'ye göre %6,8 ve T'ye göre %7,9 daha yüksektir. Tüm hibrit reçine karışımları içerisinde en düşük çekme E modülü ortoftalik-izoftalik-tereftalik (OIT) hibrit reçine için 3399 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu çekme E modülü maksimum olarak, içeriğinde yer alan I ham reçine bileşeninin çekme E modulu değerlerinden %6,6 daha düşüktür.

Ham reçine çekme uzama değerleri kıyaslandığında; Ortoftalik (O), izoftalik (I), tereftalik (T) ve epoksi bazlı vinilester (V) ham reçineler için sırasıyla O: %2,8, I: %2,78, T: %2,76 ve V: %3,74 olarak; en yüksek sonuç vinilester reçine için bulunmuşken ikili ve üçlü hibrit reçinelerde ise ortoftalik-tereftalik-vinilester (OTV) reçinede için %30 olarak tespit edilmiştir. Tüm hibrit reçine karışımları içerisinde en düşük çekme uzaması tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV) hibrit reçine için %2,68 olarak tespit edilmiştir. İkili hibrit reçine karıımlarında ise en yüksek çekme uzama sonucu %2,93 ile izoftalik-vinilester (IV) reçinede bulunmuştur.

Sonuç olarak hibrit reçine karışımlarının çekme dayanımı, çekme E modülü ham reçinelere kıyasla daha yüksek performas sergilemiş olup; reçinelerin hibridizasyonunun çekme dayanımı üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Çekme dayanımındaki bu iyileşme; zincirlerin genişleyerek ağ yapilerının iç içe geçmesi ile çapraz bağ derecesinin yükselmesinin etkisi olduğu düşünülmektedir. HDT ve TGA analizleri de bu sonuçları doğrulamaktadır.

%5 cam elyaf takviyeli hibrit reçine karışımlarında çekme dayanımı cam elyaf takviyesiz hibrit reçine karışımı ile karşileştırıldığında; TIV hibrit karışım için %27 ve OV, IV, TV için %23 fazla bulunmuştur.

%10 cam elyaf takviyeli hibrit reçine karışımlarında çekme dayanımı cam elyaf takviyesiz hibrit reçine karışımına göre sadece en yüksek artış OV karışımı için %52, en

düşük TI reçine karışımı için ise %8 arttığı görülmüştür. Diğer tüm karışımlar için sonuçlar bu iki oran arasındadır.

%20 cam elyaf takviyeli ikili hibrit reçine karışımlarında ise; çekme dayanımı cam elyaf takviyesiz hibrit reçine karışımları ile karşileştırdığımızda OV reçine karışımında %54 çekme dayanımda artış olduğu görülmüştür. OI hibrit reçinesinde takviyesiz duruma göre %16 çekme dayanımda artış olduğu görülmüştür. Diğer ikili ve üçlü hibrit karışımlarda ise cam elyaf takviyesi ile çekme dayanımı bu yönde değerleri arasında artış olmuştur.

%5 cam elyaf takviyeli ikili hibrit reçine karışımlarında çekme E modulü cam elyaf takviyesiz hibrit reçine karışımına göre; TIV karışımı için aynı değerde kalırken; maksimum artış OT hibrit karışımı için %36 daha yüksek olarak bulunmuştur. %10 cam elyaf takviyeli hibrit reçine karışımlarında çekme E modulu cam elyaf takviyesiz hibrit reçine karışımına göre minimum TI karışımı için %38, maksimum OIT karışımı için %69 daha yüksek olarak bulunmuştur. %20 cam elyaf takviyeli ikili hibrit reçine karışımlarında çekme E modulu cam elyaf takviyesiz hibrit reçine karışımına göre minimum OIT karışımı için %70, maksimum OIV ve OV karışımları için %104 daha yüksek olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, matris reçine hibridizasyonunun elyaf takviyesi ile güçlendirildiğinde en iyi çekme modül sonuçlarının ağırlıkça %20 elyaf takviyesi için, elyaf takviyesiz karışımlara göre daha yüksek olarak elde edildiği görülmüştür. Ayrıca elyaf oranı arttıkça hibrit reçine karışımlarının çekme modüllerinin yükseldiği görülmüştür. Elyafsiz hibrit karışımlarına kıyasla elyaflı hibrit reçine kompozitlerinin çekme modül değerlerinin yüksek olması, cam elyafının modulus değerinin doymamış polyester reçinelerine göre çok daha yüksek olması sebebiyle beklenen bir sonuçtur.

%5 cam elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin çekme uzama değerleri elyaf takviyesiz hibrit reçine karışımları ile kıyaslandığında minimum TIV ve TV karışımı için %66, maksimum OV ve OI karışımı için %77 olmak üzere tüm elyaflı karışımlarda daha düşük sonuçlar bulunmuştur. %10 cam elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin çekme uzama değerleri elyaf takviyesiz hibrit reçine karışımları ile kıyaslandığında minimum TV karışımı için %66, maksimum OT karışımı için %79 arasında olmak üzere tüm elyaflı karışımlarda daha düşük sonuçlar bulunmuştur. %20 cam elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin çekme uzama değerleri elyaf takviyesiz hibrit reçine karışımları ile kıyaslandığında minimum TV karışımı için %69, maksimum OI karışımı için %82

arasında olmak üzere tüm elyaflı karışımlarda daha düşük sonuçlar bulunmuştur. Sonuç olarak, elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin çekme uzama değerleri elyaf takviyesiz hibrit reçinelere göre daha düşük elde edilmiştir. Elyaf takviyeli hibrit reçine kompozitlerinin elyaf takviyesiz hibrit reçinelere kıyasla daha gevrek ve kırılgan özellik gösterdiği söylenebilir.

Sonuç olarak, matris reçine hibridizasyonunun elyaf takviyesi ile güçlendirildiğinde çekme dayanımı sonuçlarında artış olduğu görülmüş olup, ağırlıkça %20 elyaf takviyesi için, elyaf takviyesiz karışımlara göre en yüksek artış elde edildiği görülmüştür. Ayrıca elyaf oranı arttıkça hibrit reçine karışımlarının çekme dayanımların genel olarak yükseldiği görülmüştür. Bu sonuçlar elyaf takviyesi ile matrisin yükleri transferinin olumlu etkilenmiş olmasından kaynaklanmaktadır.

Eğilme Dayanımı Testi

Ham reçineler ile yapilen eğilme dayanım testlerinde en yüksek sonuç vinilester reçinede 146,3 MPa olarak tespit edilmiştır. Hibrit reçinelerde ise en yüksek eğilme dayanımı ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV) reçineden 152,7 MPa olarak kendi bileşenlerinin herbirinden daha yüksek olarak V'ye göre %4,3, O'ya göre %20,1 ve I'ya göre %23,9 şeklinde daha yüksek bulunmuştur.

Hazırlanan tüm hibrit reçine karışımları arasında en düşük eğilme dayanımı sonucu ise; tereftalik-vinilester (TV) reçinede 123 MPa olarak bulunmuş olup; ham vinilester reçine ile kıyaslandığında %18,9 daha düşük bulunmuştur.

Hibrit reçine karışımları içerisinde en yüksek eğilme E modülü ortoftalik-izoftalik (OI) reçinede hibrit reçine için 3507 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu değer ortoftalik ham reçine eğilme E modulu değerinden %2,5, izoftalik ham reçine eğilme E modulu değerinden %12,7 daha yüksektir. Tüm hibrit reçine karışımları içerisinde en düşük eğilme E modülü tereftalik-izoftalik-vinilester (TIV) hibrit reçine için 3232 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu eğilme E modülü içeriğinde yer alan ham vinilester reçine bileşenininkinden %7,6 daha düşük iken, ham izoftalik reçine bileşeninin çekme E modulu değerlerinden %3,9 daha yüksek, ham tereftalik reçine bileşenininkinden ise %7,6 daha yüksektir.

%5 cam elyaf takviyeli hibrit reçine karışımlarında eğilme dayanımı cam elyaf takviyesiz karışıma kıyasla en yüksek %22 daha yüksek olarak takviyesiz hibrit reçine karışımına göre IV hibrit karışımı tespit edilmiş olup tüm elyaflı karışımlarda daha

yüksek sonuçlar bulunmuştur.%10 cam elyaf takviyeli hibrit reçine karışımlarında eğilme dayanımı cam elyaf takviyesiz hibrit reçine karışımına göre maksimum TV karışımı için %29 yüksek, minimum OIV reçine karışımı için %1 yüksek olarak elde edilmiştir. %20 cam elyaf takviyeli hibrit reçine karışımlarında ise; eğilme dayanımı cam elyaf takviyesiz hibrit reçine karışımına göre maksimum TIV karışımı için %41 yüksek olarak, minimum OTV karışımı için %10 daha yüksek olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, matris reçine hibridizasyonunun elyaf takviyesi ile güçlendirildiğinde en iyi eğilme dayanımı sonuçlarının ağırlıkça %20 elyaf takviyesi için, elyaf takviyesiz karışımlara göre daha yüksek olarak elde edildiği görülmüştür. Ayrıca elyaf oranı arttıkça hibrit reçine karışımlarının eğilme dayanımların yükseldiği görülmüştür.

%5 cam elyaf takviyeli ikili hibrit reçine karışımlarında eğilme E modulu cam elyaf takviyesiz hibrit reçine karışımına göre; minimum OTV karışımı için %4 daha yüksek, maksimum OV hibrit karışımı için %22 daha yüksek olarak bulunmuştur. Tüm hibrit karışımdan elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin eğilme modülünün elyaf takviyesiz hibrit reçine karışımlarına göre arttığı tespit edilmiştir. %10 cam elyaf takviyeli hibrit reçine karışımlarında eğilme E modulu cam elyaf takviyesiz hibrit reçine karışımına göre minimum IV karışımı için %11, maksimum OIT karışımı için %35 daha yüksek olarak bulunmuştur. %20 cam elyaf takviyeli ikili hibrit reçine karışımlarında eğilme E modulu cam elyaf takviyesiz hibrit reçine karışımına göre minimum OI karışımı için %35, maksimum TIV karışımı için %64 daha yüksek olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, matris reçine hibridizasyonunun elyaf takviyesi ile güçlendirildiğinde en iyi eğilme modül sonuçlarının ağırlıkça %20 elyaf takviyesi için, elyaf takviyesiz karışımlara göre daha yüksek olarak elde edildiği görülmüştür. Ayrıca elyaf oranı arttıkça hibrit reçine karışımlarının eğilme modüllerinin yükseldiği görülmüştür. Elyafsiz hibrit karışımlarına kıyasla elyaflı hibrit reçine kompozitlerinin eğilme modül değerlerinin yüksek olması, cam elyafının eğilme modulus değerinin doymamış polyester reçinelerine göre çok daha yüksek olması sebebiyle beklenen bir sonuçtur.

Charpy Darbe Dayanımı Testi

Charpy darbe dayanımı test sonuçları incelendiğinde; tüm hibrit karışımlar içerisinde en yüksek değer ortoftalik-izoftalik-vinilester (OIV) reçine için 11,98 kj/m^2 olarak tespit edilmiştir. Bu değer minimum olarak, ham vinilester reçineye göre %7,1; maksimum olarak, ham ortoftalik reçineye göre %88,9 olarak elde edilmiştir.

İkili hibrit karışımlarda en yüksek Charpy darbe dayanımı değeri izoftalik-vinilester (IV) hibrit reçine karışımı için 11,12 kj/m^2 olarak tespit edilmiştir. Bu reçineyi oluşturan ham vinilester reçinesi için charpy dayanımı hamem hemen aynı olarak 11,18 kj/m^2 iken; izoftalik reçineye kıyasla %45 daha yüksek bulunmuştur.

HDT Testi

Hibrit reçine karışımları üzerinde gerçekleştirilen HDT testi sonuçları kıyaslandığında; en yüksek değer izoftalik-vinilester (IV) reçine için 94ºC olarak tespit edilmiştir. Bu değer ham izoftalik reçinenin 91,3 ºC ve vinilester reçine için 90,5 ºC olarak tespit edilen HDT değerlerine göre daha yüksektir. En düşük HDT değeri ortoftalik-vinilester (OV) reçine için 78,9 ºC olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak karışımların HDT değerlerine bakıldığında reçine ve hibrit karışımlarında istenen moleküler aderansların ve çapraz ağ yapısının yeterli seviyelerde sağlandığı sonucuna ulaşilebilir.

FT-IR

FT-IR spektrumları ham reçineler olan O, I, T ve V için, ikili hibrit reçine karışımları olan OV, IV, TV, OI, OT, TI için ve üç bileşenli hibrit reçine karışımları olan OIT, OIV, TIV, OTV olmak üzere üç ayrı grafikte birbiri ile kıyaslanacak şekilde değerlendirilmiştir. Tüm karışımların spektrumlarında genel olarak:

- 1725 cm^{-1} bandında karbonil grubuna ait C=O etkileşimleri
- 1120 cm^{-1} bandında Karbonil gruplarına ait C-O gerilme titreşimleri
- 2900-3050 cm^{-1} bandında C-H asimetrik ve gerilme titreşimleri
- 1455 cm^{-1} bandında CH_2 gruplarına ait eğilme titreşimleri
- 1507 cm^{-1} bandında aromatik halkadan kaynaklı C-C etkileşimleri

gözlenmiştir.

Bununla birlikte yine tüm spektrumlarda polimerleşme reaksiyonunda önemli bir pik olan ve polimerizasyon karakterini belirleyen stirene ait karakteristik C=C titreşimi sırasıyla 914 cm^{-1} ve 912 cm^{-1}'de gözlenmesi gerekirken, gözlenmemiştir.

Sonuç olarak tüm karışımlar için stiren polimerizasyon karakterini belirleyen piklerinin olmaması tüm karışımlarda polimerleşme reaksiyonunun gerçekleştiğini ifade etmektedir.

TGA

TGA sonuçları değerlendirildiğinde; izoftalik, tereftalik ve vinilester reçinelerin bozunma eğrilerinin birbirine yakın özeliklere sahip olduğu görülmüştür. İkili reçine karışımlarından hazırlanan hibrit reçinelerin sıcaklığa bağlı kütle kayıpları incelendiğinde; polimerlerdeki suyun ve düşük molekül ağırlıklı grupların yapıdan uzaklaşmasından kaynaklanan kütle kaybı ile ana yapının bozunmasından kaynaklanan kütle kaybı olarak iki aşamada gerçekleştiği görülmüştür. 250 °C-550 °C olan ikinci bölümde büyük kütle kayıpları gerçekleşmiştir. Bu bölgede IV karışımının ise diğer gruplara oranla termal kararlılığının daha yüksek oranda olduğu görülmüştür. Bu bölgede, IV karışımının %98,22 oranında kütle kaybına uğradığı belirlenmiştir. Ayrıca ftalik asit bazlı reçinelerden elde edilen reçinelerin genel olarak, tek tip vinilester reçineden elde edilen kompozite oranla daha yüksek termal kararlılığa sahip olduğu görülmüştür. Üçlü reçine karışımlarından hazırlanan hibrit reçinelerin sıcaklığa bağlı kütle kayıpları incelendiğinde; burada da polimerlerdeki suyun ve düşük molekül ağırlıklı grupların yapıdan uzaklaşmasından kaynaklanan kütle kaybı ile ana yapının bozunmasından kaynaklanan kütle kaybı olarak iki aşamada gerçekleştiği görülmüştür.

Yapılan literatür taramaları ve bu çalışma kapsamındaki deneysel bulgular birlikte değerlendirildiğinde; kompozit yapının boşluksuz bir yapıda, uygun elyaf-rmatris arayüz dayanımında olması gibi kompozit yapının kusur içermeyecek şekilde ve doğru koşullarda kürleştirilmesinin mekanik özellikleri olumlu etkilediği söylenebilir.

Tüm deneysel bulgular göz önünde bulundurulduğunda; reçinelerin hibrit kullanımları ile mekanik ve fiziksel özelliklerinde iyileşmelerin sağlandığı, bu sayede çeşitli kompozit üretimlerinde araştırma kapsamında kullanılan reçinelerin hibrit kullanımları ile üstün mekanik ve fiziksel özelliklere sahip ekonomik kompozitlerin üretilebileceği görülmektedir.

Gelecek çalışmalarda cam elyafı takviyeli hibrit kompozit reçine karışımlarının uzun süreli performasları hakkında bilgi sahibi olunması amacıyla bu karışımlar üzerinde durabilete çalışmaları ile birlikte yorulma testleri gerçekleştirilebilir. Ayrıca yine üstün özellikli kompozitler elde edilmek amaçlanarak farklı türdeki epoksi polimer reçineler ile yeni hibrit kompozitler üretilerek mekanik, fiziksel ve termal özelliklerinin araştırılması önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

[1] M. V. Cid Alfaro, A. S. J. Suiker, R. de Borst, and J. J. C. Remmers, “Analysis of fracture and delamination in laminates using 3D numerical modelling,” Eng. Fract. Mech., c. 76, no. 6, ss. 761–780, 2009.

[2] T. J. Reinhart, “Overview of Composite Materials,” Handbook of Composites, Boston, MA: Springer US, 1998, ss. 21–33.

[3] K. K. Chawla, "Composite materials: Science and engineering", 3rd edition. 2012, ss. 73-74.

[4] L. Lucintel, “Growth Opportunities in the Global Composites Industry,” Materials, Markets and Technologies. Lucintel LL C., Dallas, 2018, ss. 75-238.

[5] K. B Armstrong, “Advantages and Disadvantages of Composite Material,” Care Repair Adv. Compos., 1998, ss. 209-213.

[6] M. A. Masuelli, "Introduction of Fibre-Reinforced Polymers-Polymers and Composites : Concepts , Properties and Processes", ss. 1-40, 2013.

[7] A. B. Cherian, L. A. Varghese, and E. T. Thachil, “Epoxy-modified, unsaturated polyester hybrid networks,” Eur. Polym. J., c. 43, no. 4, ss. 1460–1469, 2007.

[8] P. Carollo and B. Grospietro, “Plastic materials" Macromolecular Symposia, c. 208, no. 89, ss. 335–351, 2004.

[9] A. Bhattacharya, J. W. Rawlins, and P. Ray, "Polymer Grafting and Crosslinking," 2008., ss. 1–65.

[10] I. Walker and A. A. Collyer, “Rubber toughening mechanisms in polymeric materials,” in Rubber Toughened Engineering Plastics, ss. 29–56, 2011.

[11] C. M. Lubi, K. Ravi, A. Ahammed, and E. T. Thachil, “Modification of unsaturated polyester resin using elastomers,” J. Elastomers Plast., c. 32, no. 1, ss. 60–72, 2000.

[12] K. Dinakaran, M. Alagar, and R. S. Kumar, “Preparation and characterization of bismaleimide/1,3-dicyanatobenzene modified epoxy intercrosslinked matrices,” Eur. Polym. J., c. 39, no. 11, ss. 2225–2233, 2003.

[13] K. Dinakaran and M. Alagar, “Preparation and characterization of bismaleimide (N,N′-bismaleimido-4,4′-diphenyl methane)-unsaturated polyester modified epoxy intercrosslinked matrices,” J. Appl. Polym. Sci., c. 85, no. 14, ss. 2853–2861, 2002.

[14] Y. C. Chou and L. J. Lee, “Reaction induced phase separation during the formation of a polyurethane unsaturated polyester interpenetrating polymer network,” Polym. Eng. Sci., c. 34, no. 16, ss. 1239–1249, 1994.

[15] A. B. Cherian, B. T. Abraham, and E. T. Thachil, “Modification of unsaturated polyester resin by polyurethane prepolymers,” J. Appl. Polym. Sci., c. 100, no. 1, ss. 449–456, 2006.

[16] A. K. Kaw, "Mechanics of Composite Materials, Second Edition", ss. 317–321, 2005.

[17] V. M. Osipov and A. V. Soldatkina, “Main Organizational And Economic Composites Of Strategıc Plannıng Of Development Of The Informational Sector Of Ukraine,” Econ. Innov., c. 19, no. 1(63), ss. 216–223, 2017.

[18] S. L. Ogin, “Textile-reinforced composite materials,” in Handbook of Technical Textiles, 2010, ss. 264–281.

[19] S. Peters, "Handbook of Composites," 2012, ss. 21–115.

[20] P. Lucas and G. Zanella, “Mise en œuvre des composites TP Compounds à fibres courtes et longues,” Tech. l’Ingénieur, ss. 160-201, 2007.

[21] W. W. Wright, “Composite materials series-3: Textile structural composites,” Br. Polym. J., c. 22, no. 1, ss. 85–86, 2007.

[22] X. Legrand, C. Cochrane, and V. Koncar, “A complex shaped-reinforced thermoplastic composite part made of commingled yarns with an integrated sensor,” Smart Textiles and Their Applications, 2016, ss. 353–374.

[23] L. C. Hollaway and P. R. Head, “Composite Materials and Structures in Civil Engineering,” Comprehensive Composite Materials, 2004, ss. 489–527.

[24] J. Bai, "Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications", 2013, ss. 1–906.

[25] L. C. Hollaway, “A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties,” Construction and Building Materials, c. 24, no. 12. ss. 2419–2445, 2010.

[26] L. C. Hollaway and P. R. Head, “Advanced polymer composite materials and their components,” Advanced Polymer Composites and Polymers in the Civil Infrastructure, 2007, ss. 7–35.

[27] A. B. Strong, Fundamentals of Composites Manufacturing, ss. 17–95. 2008.

[28] J. S. Vyas, L. Zhao, M. H. Ansley, and J. Xia, “Characterization of a Low-Profile Fiber-Reinforced Polymer Deck System for Moveable Bridges,” J. Bridg. Eng., c. 14, no. 1, ss. 55–65, 2008.

[29] C. Mikami, H. C. Wu, and A. Elarbi, “Effect of hot temperature on pull-off strength of FRP bonded concrete,” Construction Building Material, c. 91, ss. 180–186, 2015.

[30] C. G. Dávile, P. P. Camanho, and C. A. Rose, “Failure criteria for FRP laminates,” J. Composite Materials, c. 39, no. 4, ss. 323–345, 2005.

[31] S. Oller, S. A. Oller Aramayo, L. G. Nallim, and X. Martinez, “Composite Materials,” in Comprehensive Energy Systems, c. 2–5, 2018, ss. 235–265.

[32] M. Kalantari, C. Dong, and I. J. Davies, “Multi-objective robust optimisation of unidirectional carbon/glass fibre reinforced hybrid composites under flexural loading,” Composite Structures, c. 138, ss. 264–275, 2016.

[33] L. Ferrante et al., “Behaviour of woven hybrid basalt-carbon/epoxy composites subjected to laser shock wave testing: Preliminary results,” Composite Part B Eng., c. 78, ss. 162–173, 2015.

[34] N. Saba and M. Jawaid, “Epoxy resin based hybrid polymer composites,” in Hybrid Polymer Composite Materials: Properties and Characterisation, 2017, ss. 57–82.

[35] N. L. Hancox, “Composites design,” Composites, c. 19, no. 1, ss. 75, 2003.

[36] R. B. Seymour, “Plastics,” Ind. Eng. Chem., c. 52, no. 12, ss. 1038–1042, 1960.

[37] O. Corning, “Glass Fiber Reinforcement Chemical Resistance Guide,” ss. 1–32, 2011.

[38] F. C. Campbell, “Chapter 1: Introduction to composite materials,” Structural Composite Materials, 2010.

[39] V. Koncar, “Composites and hybrid structures,” in Smart Textiles for In Situ Monitoring of Composites, 2018, ss. 153–215.

[40] R. McMican, “Sizing stability is a key element for glass fibre manufacturing,” Reinforced Plastics, c. 56, no. 5, ss. 29–32, 2012.

[41] P. G. Pape, “Adhesion Promoters: Silene Coupling Agents,” in Applied Plastics Engineering Handbook: Processing, Materials, and Applications: 2nd Edition, 2016, ss. 555–572.

[42] R. L. King, “Fibre-reinforced composites materials, manufacturing and design,” Composites, c. 20, no. 2, ss. 172–173, 1989.

[43] C. D. Warren, J. T. Shaffer, F. L. Paulauskas, and M. G. Abdullah, “Low Cost Carbon Fiber for the Next Generation of Vehicles:Novel Technologies,” in SAE Technical Paper Series, c. 1, ss. 23–78, 2010.

[44] M. J. Jweeg, A. S. Hammood, and M. Al-Waily, “Experimental and theoretical studies of mechanical properties for reinforcement fiber types of composite materials,” Int. J. Mech. Mechatronics Eng., c. 12, no. 4, ss. 62–75, 2012.

[45] M. Ertekin, “Aramid fibers,” in Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites, 2017, ss. 153–167.

[46] M. Jassal and S. Ghosh, “Aramid fibres-An overview,” Indian J. Fibre Text. Res., c. 27, no. 3, ss. 290–306, 2002.

[47] D. J. Andrew and S. L. Wright-Williams, “REACH,” in Issues in Toxicology, c. 2018-Janua, no. 36, 2018, ss. 468–504.

[48] A. K. Mohanty, M. Misra, and G. Hinrichsen, “Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview,” Macromolecular Materials and Engineering, c. 276–277. ss. 1–24, 2000.

[49] M. Carus and A. Eder, “WPC and natural fibre composites: Market and trends in Europe,” JEC Compos. Mag., 2014.

[50] D. Nabi Saheb and J. P. Jog, “Natural fiber polymer composites: A review,” Adv. Polym. Technol., c. 18, no. 4, ss. 351–363, 1999.

[51] M. Balasubramanian, “Polymer Matrix Composites,” in Composite materials and processing, 2013, ss. 167–266.

[52] C. S. H. Bawn, “Encyclopedia of polymer science and engineering,” Polymer (Guildf)., 2003, ss. 155–175.

[53] R. Zimmermann, “Condensation Polymers: By Interfacial and Solution Methods.

Von P. W. Morgan. John Wiley & Sons, New York London-Sydney 1965. 1. Aufl., XVIII, 561 S., zahlr. Abb., mehrere Tab., geb. £ 9.10.–," Angew. Chemie, c. 78, no. 16, ss. 787, 2007.

[54] K. G. Johnson and L. S. Yang, "Preparation, Properties and Applications of Unsaturated Polyesters," in Modern Polyesters: Chemistry and Technology of Polyesters and Copolyesters, 2004, ss. 697–713.

[55] T. J. Reinhart, "Polymer-matrix composites," Adv. Mater. Process., ss. 57–113, 1990.

[56] S. Zhandarov and E. Mäder, "Characterization of fiber/matrix interface strength: Applicability of different tests, approaches and parameters," Compos. Sci. Technol., c. 65, no. 1, ss. 149–160, 2005.

[57] Y. Ma, Y. Yang, T. Sugahara, and H. Hamada, "A study on the failure behavior and mechanical properties of unidirectional fiber reinforced thermosetting and thermoplastic composites," Composites Part B: Engineering, c. 99. ss. 162–172, 2016.

[58] P. Penczek, P. Czub, and J. Pielichowski, "Unsaturated polyester resins: Chemistry and technology," Advances in Polymer Science, c. 184. ss. 1–95, 2005.

[59] B. Dholakiya, "Unsaturated Polyester Resin for Specialty Applications," in Polyester, ss. 168–194, 2012.

[60] L. C. Hollaway and P. R. Head, "Manufacture and properties of advanced polymer composites relevant to civil engineering BT -Advanced Polymer Composites and Polymers in the Civil Infrastructure," ss. 37–38, 2007.

[61] D. A. Rudd, A. C. Long, K. N. Kendall, and C. Mangin, "Resin systems," in Liquid moulding technologies: Resin transfer moulding, structural reaction injection moulding and related processing techniques, ss. 22–35, 2010.

[62] A. Kandelbauer, G. Tondi, O. C. Zaske, and S. H. Goodman, "Unsaturated Polyesters and Vinyl Esters," in Handbook of Thermoset Plastics, 2013, ss. 111–172.

[63] M. Flemming, G. Ziegmann, and S. Roth, Faserverbundbauweisen. 2011, ss. 5–22.

[64] P. Christian, "Polymer chemistry," in Electrospinning for Tissue Regeneration, 2011, ss. 34–50.

[65] G. Pritchard, "Thermosetting Resins for Reinforced Plastics," in Developments in Reinforced Plastics—1, 1980, ss. 1–28.

[66] P. Penczek, P. Czub, and J. Pielichowski, "Unsaturated Polyester Resins: Chemistry and Technology BT-Crosslinking in Materials Science," in Crosslinking in Materials Science. Advances in Polymer Science, 2005, ss. 1–95.

[67] C. Benton, "Vinyl ester resins," J. Chem. Educ., 2009, ss. 1–144.

[68] P. E. Irving and C. Soutis, Polymer Composites in the Aerospace Industry. 2014, ss. 155–190.

[69] N. Saba, M. Jawaid, O. Y. Alothman, M. T. Paridah, and A. Hassan, "Recent advances in epoxy resin, natural fiber-reinforced epoxy composites and their

applications," Journal of Reinforced Plastics and Composites, c. 35, no. 6. ss. 447–470, 2016.

[70] T. Vidil, F. Tournilhac, S. Musso, A. Robisson, and L. Leibler, "Control of reactions and network structures of epoxy thermosets," Progress in Polymer Science, c. 62. ss. 126–179, 2016.

[71] L. X. Gong, L. Zhao, L. C. Tang, H. Y. Liu, and Y. W. Mai, "Balanced electrical, thermal and mechanical properties of epoxy composites filled with chemically reduced graphene oxide and rubber nanoparticles," Compos. Sci. Technol., c. 121, ss. 104–114, 2015.

[72] N. Saba, M. Jawaid, M. T. Paridah, and O. Y. Al-othman, "A review on flammability of epoxy polymer, cellulosic and non-cellulosic fiber reinforced epoxy composites," Polymers for Advanced Technologies, c. 27, no. 5. ss. 577–590, 2016.

[73] O. C. Zaske and S. H. Goodman, "Unsaturated Polyester and Vinyl Ester Resins," in Handbook of Thermoset Plastics, 2008, ss. 97–168.

[74] H. Dodiuk and S. H. Goodman, Handbook of Thermoset Plastics, ss. 17–160, 2013.

[75] M. A. Dubé, E. Saldívar-Guerra, and I. Zapata-González, "Copolymerization," in Handbook of Polymer Synthesis, Characterization, and Processing, 2013, ss. 105–125.

[76] N. L. Hancox, "Delaware composites design encyclopedia — volumes 2–6," Composites, c. 22, no. 4, ss. 328, 2003.

[77] F. A. Cassis and R. C. Talbot, "Polyester and Vinyl Ester Resins," in Handbook of Composites, 2011, ss. 34–47.

[78] J. Kim, D. Jeong, C. Son, Y. Lee, E. Kim, and I. Moon, "Synthesis and applications of unsaturated polyester resins based on PET waste," Korean J. Chem. Eng., c. 24, no. 6, ss. 1076–1083, 2007.

[79] F. Lutz and R. W. Phillips, "A classification and evaluation of composite resin systems," J. Prosthet. Dent., c. 50, no. 4, ss. 480–488, 1983.

[80] H. Nava, "Polyesters, Unsaturated," in Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 2015, ss. 1–24.

[81] E. Bennett-Huntley, "Epoxy resin vs vinylester vs polyester: use and application overview," Compos. Resin Dev., ss. 104–119, 2014.

[82] P. Penczek, P. Czub, and J. Pielichowski, "Unsaturated polyester resins: Chemistry and technology," Advances in Polymer Science, c. 184. ss. 1–95, 2005.

[83] H. Yang and L. J. Lee, "Comparison of unsaturated polyester and vinylester resins in low temperature polymerization," J. Appl. Polym. Sci., c. 79, no. 7, ss. 1230–1242, 2001.

[84] L. S. Norwood and A. F. Millman, "The influence of resin system, cure and postcure on the mechanical performance of glass fibre reinforced polyesters," in Advances in Composite Materials, 2013, ss. 1544–1563.

[85] A. F. Johnson, "An Introduction to Composite Materials," Phys. Bull., c. 33, no.

9, ss. 333–333, 1982.

[86] D. D. L. Chung, “Polymer-Matrix Composites: Structure and Processing,” in Carbon Composites, ss. 161–217, 2016.

[87] G. C. Papanicolaou, S. A. Paipetis, and P. S. Theocaris, “The concept of boundary interphase in composite mechanics,” Colloid Polym. Sci. Kolloid-Zeitschrift Zeitschrift für Polym., c. 256, no. 7, ss. 625–630, 1978.

[88] J. Karger-Kocsis, H. Mahmood, and A. Pegoretti, “Recent advances in fiber/matrix interphase engineering for polymer composites,” Progress in Materials Science, c. 73. ss. 1–43, 2015.

[89] W. T. Y. Tze, D. J. Gardner, C. P. Tripp, and S. C. O’Neill, “Cellulose fiber/polymer adhesion: Effects of fiber/matrix interfacial chemistry on the micromechanics of the interphase,” J. Adhes. Sci. Technol., c. 20, no. 15, ss. 1649–1668, 2006.

[90] S. Keszei, S. Matkó, G. Bertalan, P. Anna, G. Marosi, and A. Tóth, “Progress in interface modifications: From compatibilization to adaptive and smart interphases,” Eur. Polym. J., c. 41, no. 4, ss. 697–705, 2005.

[91] G. Martinez-Barrera, A. L. Martinez-Hernindez, C. Velasco-Santos, and W. Brostow, “Polymer concretes improved by fiber reinforcement and gamma irradiation,” E-Polymers, ss. 1–13, 2009.

[92] D. Cattel, C. Services, Crewe, and Cheshire, “Resin systems,” in Specialist Floor Finishes:, 2010, ss. 22–35.

[93] G. W. Ehrenstein, “Faserverbund-Kunststoffe,” 2018, ss. 1–29.

[94] M. Z. S. Khan, G. Simpson, and C. R. Townsend, “A comparison of the mechanical properties in compression of two resin systems,” Mater. Lett., c. 52, no. 3, ss. 173–179, 2002.

[95] M. Z. S. Khan, G. Simpson, and E. P. Gellert, “Resistance of glass-fibre reinforced polymer composites to increasing compressive strain rates and loading rates,” Composites Part A Appl. Sci. Manuf., c. 31, no. 1, ss. 57–67, 2000.

[96] M. H. Banna, J. Shirokoff, and J. Molgaard, “Effects of two aqueous acidic solutions on polyester and bisphenol A epoxy vinyl ester resins,” Mater. Sci. Eng. A, c. 528, no. 4–5, ss. 2137–2142, 2011.

[97] P. N. Dave and N. N. Patel, “Synthesis, characterization of novel interacting blends of acrylated poly(ester-amide)s containing epoxy residues with vinyl ester resin,” J. Saudi Chem. Soc., c. 18, no. 5, ss. 398–403, 2014.

[98] S. Marouani, L. Curtil, and P. Hamelin, “Ageing of carbon/epoxy and carbon/vinylester composites used in the reinforcement and/or the repair of civil engineering structures,” Compos. Part B Eng., c. 43, no. 4, ss. 2020–2030, 2012.

[99] F. L. Jin and S. J. Park, “Thermal properties of epoxy resin/filler hybrid composites,” Polym. Degrad. Stab., c. 97, no. 11, ss. 2148–2153, 2012.

[100] A. Gopinath, M. Senthil Kumar, and A. Elayaperumal, “Experimental investigations on mechanical properties of jute fiber reinforced composites with polyester and epoxy resin matrices,” in Procedia Engineering, 2014, c. 97, ss. 2052–2063.

[101] J. D. Garcia-Espinel, D. Castro-Fresno, P. Parbole Gayo, and F. Ballester-Muñoz, “Effects of sea water environment on glass fiber reinforced plastic materials used for marine civil engineering constructions,” Mater. Des., c. 66, no. PA, ss. 46–50, 2015.

[102] Y. Ou and D. Zhu, “Tensile behavior of glass fiber reinforced composite at different strain rates and temperatures,” Constr. Build. Mater., c. 96, ss. 648–656, 2015.

[103] Y. Li, X. Liu, J. Yuan, and M. Wu, “Toughness improvement of epoxy resin mortar by incorporation of ground calcium carbonate,” Constr. Build. Mater., c. 100, ss. 122–128, 2015.

[104] A. Hawa et al., “Burst strength and impact behaviour of hydrothermally aged glass fibre/epoxy composite pipes,” Mater. Des., c. 89, ss. 455–464, 2016.

[105] B. Benmokrane, A. H. Ali, H. M. Mohamed, A. ElSafty, and A. Manalo, “Laboratory assessment and durability performance of vinyl-ester, polyester, and epoxy glass-FRP bars for concrete structures,” Compos. Part B Eng., c. 114, ss. 163–174, 2017.

[106] C. G. d. Oliveira, F. M. Margem, S. N. Monteiro, and F. P. D. Lopes, “Comparison between tensile behavior of epoxy and polyester matrix composites reinforced with eucalyptus fibers,” J. Mater. Res. Technol., c. 6, no. 4, ss. 406–410, 2017.

[107] J. W. Yi, M. K. Um, J. H. Byun, S. B. Lee, and S. K. Lee, “Development of high Tg epoxy resin and mechanical properties of its fiber-reinforced composites,” J. Appl. Polym. Sci., c. 127, no. 6, ss. 4328–4333, 2013.

[108] E. Bennett-Huntley, “Epoxy Resin vs Vinylester vs Polyester: Use and Application Overview,” Compos. Resin Dev., c. 90, no. July, ss. 104–119, 2014.

[109] R. Šturm, R. Grimberg, and J. Grum, “Effect of moisture absorption on mechanical properties of polyester composites evaluated with destructive and nondestructive tests,” in 12th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing: Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering, ICNDT, 2013, ss. 189–197.

[110] A. M. Amaro, P. N. B. Reis, M. A. Neto, and C. Louro, “Effects of alkaline and acid solutions on glass/epoxy composites,” Polym. Degrad. Stab., c. 98, no. 4, ss. 853–862, 2013.

[111] X. Zhang, V. Bitaraf, S. Wei, Z. Guo, and H. A. Colorado, “Vinyl ester resin: Rheological behaviors, curing kinetics, thermomechanical, and tensile properties,” AIChE J., c. 60, no. 1, ss. 266–274, 2014.

[112] H. B. Vinay, H. K. Govindaraju, and P. Banakar, “Experimental Study on Mechanical Properties of Polymer Based Hybrid Composite,” in Materials Today: Proceedings, 2017, c. 4, no. 10, ss. 10904–10912.

[113] C. Alia, J. A. Jofre-Reche, J. C. Suárez, J. M. Arenas, and J. M. Martín-Martínez, “Characterization of the chemical structure of vinyl ester resin in a climate chamber under different conditions of degradation,” Polym. Degrad. Stab., c. 153, ss. 88–99, 2018.

[114] Y. J. You, Y. H. Park, H. Y. Kim, and J. S. Park, “Hybrid effect on tensile properties of FRP rods with various material compositions,” Compos. Struct., c.

80, no. 1, ss. 117–122, 2007.

[115] N. N. Patel and H. S. Patel, “Interacting blends of Styrenated unsaturated poly (ester-amide)s with commercial unsaturated polyester resin (o-phthalic anhydride based),” J. Saudi Chem. Soc., c. 18, no. 5, ss. 728–734, 2014.

[116] P. N. Dave and N. N. Patel, “Synthesis, properties and applications of interacting blends of acrylated novalac epoxy resin based poly(ester-amide)s and vinyl ester,” J. Saudi Chem. Soc., c. 20, ss. S231–S235, 2016.

[117] N. Guermazi, N. Haddar, K. Elleuch, and H. F. Ayedi, “Investigations on the fabrication and the characterization of glass/epoxy, carbon/epoxy and hybrid composites used in the reinforcement and the repair of aeronautic structures,” Mater. Des., c. 56, ss. 714–724, 2014.

[118] T. Gümülcine, A. Bekem, M. Doğu, Z. Gemici, and A. Ünal, “İzoftalik polyester matrisli sürekli e-camı ve bazalt fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine deneysel bir çalışma,” Mühendislik ve Fen Bilim. Derg., ss. 104–115, 2013.

[119] C. Fragassa, A. Pavlovic, and C. Santulli, “Mechanical and impact characterisation of flax and basalt fibre vinylester composites and their hybrids,” Compos. Part B Eng., c. 137, ss. 247–259, 2018.

[120] M. Indra Reddy, M. Anil Kumar, and C. Rama Bhadri Raju, “Tensile and flexural properties of Jute, Pineapple leaf and glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites,” Materials Today: Proceedings, 2018, c. 5, no. 1, ss. 458–462.

[121] M. Worzakowska, “Thermal and viscoelastic properties of novel epoxydicyclopentadiene- terminated polyesters-styrene copolymers,” Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2012, c. 109, no. 2, ss. 657–662.

[122] K. Laoubi, Z. Hamadi, A. Ahmed Benyahia, A. Serier, and Z. Azari, “Thermal behavior of E-glass fiber-reinforced unsaturated polyester composites,” Compos. Part B Eng., c. 56, ss. 520–526, 2014.

[123] J. S. Arrieta, E. Richaud, B. Fayolle, and F. Nizeyimana, “Thermal oxidation of vinyl ester and unsaturated polyester resins,” Polym. Degrad. Stab., c. 129, ss. 142–155, 2016.

[124] Standard Test Method for Indentation Hardness of Aluminum Alloys by Means of a Newage, Portable, Non-Caliper-Type Instrument, ASTM Standard, B724, 2006.

[125] Composites Turkey, Haziran 2016-Sayı:13, ss. 26–27, 2016.

[126] Plastics-Standard atmospheres for conditioning and testing, International Organization for Standardization, ISO 291, 2008.

[127] Plastics-Determination of tensile properties-Part 1: General principles, International Organization for Standardization, ISO 527-1, 2012.

[128] Plastics-Determination of flexural properties,” International Organization for Standardization, ISO 178, 2010.

[129] Plastics-Unsaturated-polyester resins -- Measurement of gel time at ambient temperature, International Organization for Standardization, ISO 2535, 2001.

[130] Standard Test Method for Gel Time of Solventless Varnishes, ASTM Standard, D 3056, 2014.

[131] Standard Test Method for Gel Time and Peak Exothermic Temperature of Reacting Thermosetting Resins, ASTM Standard, D 2471, 1999.

[132] Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer, ASTM Standard, D 2196, 2015.

[133] Standard Test Method for Indentation Hardness of Aluminum Alloys by Means of a Newage, Portable, Non-Caliper-Type Instrument, ASTM Standard, B724, 2006.

[134] E. A. Kotomin, V. Alexandrov, D. Gryaznov, R. A. Evarestov, and J. Maier, "Confinement effects for ionic carriers in SrT_iO_3 ultrathin films: First-principles calculations of oxygen vacancies," Phys. Chem. Chem. Phys., c. 13, no. 3, ss. 923–926, 2011.

[135] Determination of Charpy impact properties-Part 1: Non-instrumented impact test, International Organization for Standardization, ISO 179-1, 2010.

[136] Plastics-Determination of temperature of deflection under load -- Part 1: General test method," Geneva, International Organization for Standardization, ISO 75-1, 2013.

[137] T. Turcsan and L. Meszaros, "Mechanical performance of hybrid thermoset composites: Effects of matrix and reinforcement hybridization," Compos. Sci. Technol., c. 141, ss. 32–39, 2017.

[138] C. Varga, N. Miskolczi, L. Bartha, and G. Lipóczi, "Improving the mechanical properties of glass-fibre-reinforced polyester composites by modification of fibre surface," Mater. Des., c. 31, no. 1, ss. 185–193, 2010.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :NESLİHAN GÖKÇE

Doğum Tarihi ve Yeri :10.06.1979

Yabancı Dili :İNGİLİZCE

E-posta :nesligke@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Kompozit Malz. Tek.	Düzce Üniversitesi	2019
Y. Lisans	Polimer Bilim ve Teknolojisi	Orta Doğu Teknik Üniversitesi	2008
Lisans	Kimya Mühendisliği	Ankara Üniversitesi	2001
Lise	Süper Lise (YDA)	Çankaya Lisesi	1997