İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ISI KALKANLARI İÇİN KALIPLANABİLİR KARBON FENOLİK KOMPOZİT ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Melih Özgün MAĞDALA

Anabilim Dalı : Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Programı : Malzeme Mühendisliği

HAZİRAN 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ISI KALKANLARI İÇİN KALIPLANABİLİR KARBON FENOLİK KOMPOZİT ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Melih Özgün MAĞDALA

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 04 Mayıs 2009

Tezin savunulduğu Tarih: 01 Haziran 2009

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erdem DEMİRKESEN (İTÜ)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Gültekin GÖLLER (İTÜ)

Prof. Dr. Mehmet KOZ (MÜ)

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

Yapmış olduğum tez çalışmasının başlangıcından sonuna, engin bilgileriyle tezime yön veren, çalışmalarımda yol gösteren ve yardımcı olan tez danışmanım, değerli bilim adamı Prof. Dr. Erdem DEMİRKESEN'e teşekkür ederim.

Çalışmalarımda emeği geçen, yardım ve önerilerini esirgemeyen ve bir arkadaş olarak yanımda olan Araş. Gör. Önder GÜNEY'e teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Mayıs 2009 **Melih Özgün MAĞDALA**

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ..... iii
İÇİNDEKİLER..... v
ÇİZELGE LİSTESİ..... vii
ŞEKİL LİSTESİ..... viii
ÖZET..... ix
SUMMARY..... x
1. GİRİŞ VE AMAÇ..... 1
2. KOMPOZİT MALZEMELER..... 2
2.1. Polimerik Matrisli Kompozitler..... 3
2.1.1. Termoset matrisler..... 4
2.1.1.1. Epoksi reçine matrisler..... 4
2.1.1.2. Polyester reçine matrisler..... 5
2.1.1.3. Vinilester reçine matrisler..... 6
2.1.1.4. Fenolik reçine matrisler..... 6
2.1.2. Termoplastik matrisler..... 6
2.2. Fenolik Reçineler..... 8
3. POLİMERİK KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ..... 12
3.1. Elle Kalıplama..... 12
3.2. Spreyle Kalıplama..... 14
3.3. Vakum Torbalama Yöntemi..... 16
3.4. Flaman Sarma..... 18
3.5. Profil Çekme (Pultrüzyon)..... 18
3.6. Preste Kalıplama..... 19
3.7. Enjeksiyon Tekniği..... 19
3.8. Otoklav Yöntemi..... 19
3.9. Savurma Kalıplama..... 20
3.10. Reçine Transfer Kalıplama..... 21
4. KARBON TAKVİYEKİ KOMPOZİTLER..... 22
4.1. Karbon Fiberlerin Üretimi..... 23
4.1.1. Pan Bazlı Fiberlerin Üretimi..... 24
4.1.2. Zift Bazlı Fiberlerin Üretimi..... 25
4.2. Karbon Fiberlerin Özellikleri..... 26
4.2.1. Fiber Yapısının Özelliklere etkisi, Pan ve Arafaz Zift Başlangıç Fiberlerinin Karşılaştırılması..... 29
4.3. Polimerik Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Diğer Pekiştiriciler..... 32
4.4 Karbon Fenolik Aşınır Kompozitler..... 34
5. ISI KALKANLARI..... 36
5.1. Yeniden Kullanılabilir Isı Kalkanları..... 36
5.2. Ablatif Isı Kalkanları..... 37
5.2.1. Sla 561V..... 38

5.2.2. Avcoat 5026H/C..... 38
5.2.3. Sirca..... 39
5.2.4. Pica..... 39
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR..... 41
6.1. Amaç..... 41
6.2. Kompozit Üretiminde Kullanılan Malzemeler ve Cihazlar..... 41
6.3. Kompozit Örneklerinin Karakterizasyonu ve Karakterizasyonda Kullanılan Cihazlar..... 46
6.4. Kompozit Malzemelerin Üretimi..... 47
6.5. Sonuçlar ve Değerlendirmeler..... 54
6.5.1. Basma Testi Sonuçları..... 54
6.5.2. Çekme Testi Sonuçları..... 57
6.5.3. Isıl Karakterizasyon..... 59
7. GENEL DEĞERLENDİRME ve ÖNERİLER..... 65
8. KAYNAKLAR..... 66
9. EKLER..... 69
10. ÖZGEÇMİŞ..... 78

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Bazı Plastik Matris Malzemelerinin Özellikleri..... 4
Çizelge 2.2 : Çeşitli termoplastiklerin erime ve maksimum işlem sıcaklıkları..... 7
Çizelge 2.3 : Termoset reçinelerin alev yayılma endeksi ve duman yoğunluğu testi karşılaştırması.(ASTM E 84 tünel testi)..... 11
Çizelge 4.1 : PAN bazlı karbon fiberlerin özellikleri..... 30
Çizelge 4.2 : Arafaz zift bazlı karbon fiberlerin özellikleri..... 31
Çizelge 4.3 : Karbon fiber ve diğer fiberlerin karşılaştırılması..... 32
Çizelge 6.1 : SC1008 fenolik reçinenin fiziksel ve kimyasal özellikleri..... 44
Çizelge 6.2 : İlk üretim koşullarına göre hazırlanan kompozitlerin basma testi sonuçları.....54
Çizelge 6.3 : İkinci üretim koşullarına göre hazırlanan kompozitlerin basma testi sonuçları.....55
Çizelge 6.4 : İlk üretim koşullarına göre üretilmiş numunelerin çekme testi sonuçları.....57
Çizelge 6.5 : İkinci üretim koşullarına göre üretilmiş numunelerin çekme testi sonuçları.....58
Çizelge 6.6 : Birinci üretim koşullarına göre üretilen kompozitlerin dinamik ısı akısı testi sonuçları.....60
Çizelge 6.7 : İkinci üretim koşullarına göre üretilen kompozitlerin dinamik ısı akısı testi sonuçları.....60
Çizelge 6.8 : İlk üretim koşullarına göre üretilmiş kompozitlerin statik ısı akısı testi sonuçları..... 62
Çizelge 6.9 : İlk üretim koşullarına göre üretilmiş kompozitlerin statik ısı akısı testi sonuçları..... 62
Çizelge 6.10 : İkinci üretim koşullarına göre üretilen kompozitlerin ısıl iletkenlik ölçümü sonuçları (fırında jelleştirmeyle üretim)..... 63
Çizelge 6.11 : İkinci üretim koşullarına göre üretilmiş kompozitlerin yoğunluk değerleri..... 64

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Pekiştirici türüne göre kompozitlerin sınıflandırılması..... 3
Şekil 2.1 : Karbonyum iyonu ile fenolün reaksiyonu sonucu metilolfenol oluşumu..... 9
Şekil 2.2 : Metilolün fenolle reaksiyonu sonucu novolak oluşumu..... 9
Şekil 2.3 : Fenolik anyonun formaldehitle reaksiyonu sonucu metilolfenol oluşumu..... 10
Şekil 3.1 : El ile kalıplama yönteminin şematik gösterimi..... 13
Şekil 3.2 : El ile kalıplama yöntemi şematik gösterimi..... 14
Şekil 3.3 : Spreyleme prosesinin şematik görünümü..... 15
Şekil 3.4 : Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi..... 17
Şekil 3.5 : Filaman sarma yönteminin şematik gösterimi..... 18
Şekil 3.6 : Profil çekme yönteminin şematik gösterimi..... 19
Şekil 3.7 : Otoklav yönteminin şematik gösterimi..... 20
Şekil 3.8 : Reçine transfer kalıplama yöntemi şematik gösterimi..... 21
Şekil 4.1 : Karbon kompozitlerin kullanım alanlarından örnekler..... 22
Şekil 4.2 : PAN ve arafaz ziftten karbon fiber üretiminin şematik gösterimi..... 24
Şekil 4.3 : 400 GPa modüllü PAN bazlı karbon fiberin dalgalı şerit yapısı..... 27
Şekil 4.4 : PAN ve arafaz zift fiberlerde ısıl işlem sıcaklığıyla yönlenme derecesinin bağıntısı..... 28
Şekil 4.5 : Arafaz zift bazlı karbon fiberde yönlenme derecesiyle modül arasındaki ilişki..... 29
Şekil 4.6 : Polimerik kompozitlerde kullanılan pekiştirici fiberlerin özgül dayanımları ve özgül modülleri..... 33
Şekil 4.7 : Aşınır kompozitte meydana gelen reaksiyonların şematik gösterimi..... 35
Şekil 5.1 : Apollo mekiği komut modülünde kullanılan ısı kalkanımım karbonize olmuş durumda görünümü..... 39
Şekil 5.2 : Dragon mekiği PICA ısı kalkanlarının yerleştirilmesi..... 40
Şekil 6.1 : 0° yönlenmeli karbon dokumanın şematik gösterimi..... 42
Şekil 6.2 : 0° yönlenmeli karbon dokumanın görünümü..... 42
Şekil 6.3 : 0°/90° yönlenmenin şematik görünümü..... 43
Şekil 6.4 : 0°/+45°/-45° yönlenmeli karbon dokumanın şematik görünümü..... 43
Şekil 6.5 : 0°/+45°/-45° yönlenmeli karbon dokumanın görünümü..... 44
Şekil 6.6 : Laminasyon presi ve vakum ünitesi..... 45
Şekil 6.7 : Jelleşme işlemi için kullanılan ısıl işlem fırını ve kesme cihazı..... 46
Şekil 6.8 : Dinamik ısı akısı test düzeneği..... 47
Şekil 6.9 : a) Yüksek sıcaklığa dayanıklı film b) cam elyaf keçe c) bleeder d) Vakum torbasına alınmış, kalıplanmış kompozit..... 50
Şekil 6.10 : Üretilen karbon fenolik kompozit levhanın görünümü..... 51
Şekil 6.11 : Birinci üretim yöntemi proses akış şeması..... 52
Şekil 6.12 : İkinci üretim yöntemi proses akış şeması..... 53
Şekil 6.13 : Üretilen plakalardan kesilmiş basma testi numuneleri..... 57
Şekil 6.14 : Üretilen kompozitlerin dinamik ısı akısı testi sonrası görünümü..... 61

ISI KALKANLARI İÇİN KALIPLANABİLİR KARBON FENOLİK KOMPOZİT ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Bu çalışmada karbon fenolik esaslı kompozit ısı kalkanı üretimi gerçekleştirilmiş, üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık altındaki ısıl davranışları incelenmiştir.

Karbon fenolik kompozitler, yüksek sıcaklık altında mükemmel ablatif davranışa, düşük yoğunluğa ve yüksek mukavemete sahip, gelişmiş mühendislik malzemeleridir. Bu özellikler karbon fenolik kompozitleri uzay aracı ısı kalkanları uygulamalarında tercih edilen bir malzeme yapmıştır.

Deneysel çalışmalarda karbon fenolik kompozitlerin üretimi sıcak laminasyon prosesiyle gerçekleştirilmiştir. Pekiştirici olarak karbon dokumalar, matris olarak ise fenolik reçine kullanılmıştır. Farklı yönlenmelerde karbon dokumalar, farklı reçine-çözücü oranları ve farklı jelleştirme yöntemleri kullanılmış ve bu değişkenlerin malzemenin ısıl ve mekanik özelliklerine olan etkisi incelenmiştir.

Isıl ve mekanik özeliklerin belirlenmesi için yapılan karakterizasyon çalışmalarında, üretilen numunelere çekme ve basma dayanımı testi, statik ısı akısı testi, dinamik ısı akısı testi ve ısıl iletkenlik testleri uygulanmıştır. Uygulanan testler sonucunda mekanik ve ısıl özelliklerin, malzemenin içerdiği reçine oranından önemli derecede etkilendiği, reçine oranının ise, reçine-çözücü konsantrasyonu ve jelleştirme koşulları ile kontrol edilebildiği görülmüştür.

PRODUCTION OF MOLDABLE CARBON PHENOLIC COMPOSITES APPLIED IN HEAT SHIELDS AND CHARACTERIZATION

SUMMARY

In this study, phenolic impregnated carbon ablators are manufactured, mechanical and thermal behaviours of produced composites are observed.

Carbon phenolic composites are advanced engineering materials which have high strength, low density and excellent ablative properties. Therefore these composites are preferred for spacecraft heat shield applications.

In the experimental, carbon phenolic composites are produced by hot lamination process. Carbon fabrics are used as reinforcements and phenolic resin is used as a matrix. Different carbon vowen types, resin-solvent ratios and gelation methods are used and effects of these variables are inspected by mechanical and thermal characterizations.

Characterizations of samples involve; tensile strength test, compression test, static and dynamic heat flux test and thermal conductivity tests. As a result, thermal and mechanical properties of the composites are seen highly dependent to the resin ratio in the material. And the resin ratio can be controlled by resin-solvent ratio used and gelation conditions applied.

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Bilgi Çağı olan 21'inci yüzyılda teknolojik ilerlemeler doğrultusunda, insanlığın kullandığı malzeme çeşitliliği her geçen gün hızla artmakta ve malzeme nitelikleri endüstriyel gereksinimlere de paralel olarak geliştirilmektedir. Malzeme bilimindeki buluşlar ve yenilikler teknolojik gelişimin kuşkusuz itici gücünü oluşturmaktadır.

İnsanoğlunun çeşitli ortam ve koşullarda kullanılacak, farklı özelliklere sahip malzemelere ihtiyaç duyması, yeni malzeme arayışlarını ve beraberinde kompozitlerin geliştirilmesini getirmiştir. Kullanımı giderek yaygınlaşan kompozit malzemeler, uzay yolculukları ve yeni gezegenlerin keşfine yönelik ilginin artmasıyla uzay uygulamalarında da kullanılmaya başlanmıştır.

Atmosfere giriş ve çıkış yapan uzay araçlarının tasarlanmasında karşılaşılan en önemli sorunlardan birisi, atmosferde yüksek hız ve sürtünme sonucu meydana gelen yüksek ısıdır. Uzay araçlarını ve başta insan olmak üzere, bilimsel ekipman ve iletişim cihazlarını, oluşan bu yüksek ısıdan korumak için ısı kalkanları geliştirilmiştir. Yüksek sıcaklık dayanımıyla birlikte düşük ısı iletimine sahip olması gereken bu ısı kalkanlarının, aynı zamanda hafif de olmaları avantaj sağlamaktadır. Bu özellikleri içeren malzeme arayışları ve yapılan araştırmalar sonucunda geliştirilen malzemelerden biri de karbon fenolik ısı kalkanlarıdır.

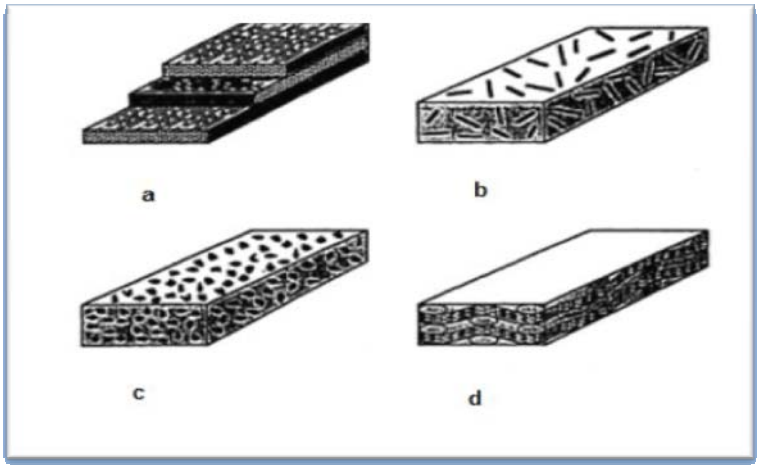
Yapılan bu çalışmada, ısı kalkanı uygulamalarında kullanılacak, karbon fenolik esaslı kalıplanabilir kompozitlerin üretimi ile birlikte yüksek sıcaklık altında ısıl davranışları ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla çeşitli karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır.

Bu amaçla mekanik ve ısıl nitelikleri üst düzeyde artırılarak, geliştirilecek ileri teknoloji ürünü malzemelerin, günümüzde teknolojisi hızla ilerleyen uzay araçlarının yanı sıra ulaşım, iletişim ve savunma endüstrisi gibi birçok alanda kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozitler kısaca farklı iki veya daha fazla malzemenin makroskobik birleşimi olup fark edilir bir ara yüzeye sahip olan malzemelerdir. Kompozitler sadece yapısal özellikleri nedeniyle kullanılmayıp ayrıca elektriksel, ısıl, tribolojik ve uygulama ortamıyla etkileşim özellikleri nedeniyle de tercih edilebilirler. Modern kompozitler genellikle kullanım alanında ihtiyaç duyulan özelliklere göre dengeli bir şekilde optimize edilmiş malzemelerdir. Çok fazla sayıda farklı malzemenin kompozit malzeme olarak sınıflandırılabilmesi ve çok geniş uygulama alanına sahip malzemeler olmaları nedeniyle bu tür malzemeleri tek bir tanım altında toplamak güçtür. Fakat kompozitler, sürekli bir matris ve bu matris bileşenin bir arada tuttuğu daha sert ve güçlü takviye elemanlarından oluşan malzemeler olarak sınıflandırılabilirler. Ayrıca takviye elemanları genellikle matristen daha iyi elektrik ve ısı iletkenliği, daha düşük ısıl genleşme katsayısı ve aşınma dayanımına sahiptirler. Fakat bunun tersi görülen bazı istisna malzemeler de vardır. Örneğin kauçuk destekli polimerlerde takviye malzemesi, matristen daha esnek ve sünek olup kompozitin tokluğunu arttırmaktadır. Benzer şekilde kamyon ve treyler türü araçların fren kampanalarında kullanılan malzemede çelik teller, gri dökme demir matris malzemesini desteklemek amacıyla kullanılmaktadır [1].

Kompozitler genel olarak iki farklı şekilde sınıflandırılır. Birinci sınıflandırma matris türüne göre olup; organik matrisli kompozitler, metal matrisli kompozitler ve seramik matrisli kompozitler olarak üçe ayrılır. Organik matrisli kompozit tanımı genel olarak iki sınıf kompoziti içerir. Bunlar polimer matrisli kompozitler ve karbon matrisli kompozitlerdir. Karbon matrisli kompozitler, genellikle polimer matrisli bir kompozitin karbonizasyon ve yoğunlaştırma aşamalarından geçirilmesiyle elde edilirler. İkinci tür sınıflandırma ise pekiştirici türüne göre olup, partikül takviyeli kompozitler, süreksiz fiberli kompozitler, sürekli fiberli kompozitler ve dokuma takviyeli kompozitler olarak ayrılırlar [1]. Şekil 2.1'de kompozitlerin pekiştirici türüne göre sınıflandırılması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Pekiştirici türüne göre kompozitlerin sınıflandırılması. a) Sürekli fiberler b)Süreksiz fiberler c) Partikül takviyeli d) Dokuma takviyeli [1].

İstenilen özelliklerin elde edilmesi için genellikle takviye elemanının hacimsel oranının %10 veya daha fazla olması gerekmektedir.

2.1. Polimerik Matrisli Kompozitler

Kompozit malzemelerde polimer esaslı matrislerin yanı sıra metal, seramik türevi malzemeler de matris olarak kullanılmaktadır. Diğer matrislerin kullanılmasına rağmen kompozit malzemelerin % 90'ı polimer esaslı matrislerle üretilmektedir. Matris malzemelerinin genellikle plastik esaslı olmasından dolayı kompozit malzemeler de genellikle takviye edilmiş plastikler olarak adlandırılırlar. Metal matrisler büyük çaplı uygulamalarda kullanılmak için pahalı ve çalışılmaları zordur. Seramik matrisler ise yüksek oranda kırılgan olmalarından dolayı yeterli dayanıklılığa sahip olmamaları nedeniyle kullanım alanları yüksek ısı ile kullanılan yerlerle sınırlanmaktadır. Karbon matrisli kompozit malzemeleri üretmek çok zor ve çok pahalıdır.

Matrisler güçlü yapıştırma, çevre ve atmosfer şartlarına yüksek dayanım ve yüksek mekanik özellikler gösterirler. Bir matrisin öncelikle sağladığı mekanik özellikler yüksek sertlik ve yüksek dayanıklılık değerleridir. İyi bir malzeme sert olmalıdır, fakat gevrek bir malzemenin gösterdiği davranışlardan dolayı performansı düşmemelidir. Bu özellikleri büyük ölçüde karşılayan polimer esaslı matrisler termoset ve termoplastik matrisler olarak iki tür olarak bulunmaktadır [2].

2.1.1. Termoset Matrisler

Termoset esaslı matrisler, kompozit malzeme matrisleri olarak en çok kullanılanlardır. Termoset plastikler sıvı halde bulunurlar, ısıtılarak ve kimyasal tepkimelerle sertleşir ve sağlamlaşırlar. Termoset polimerlerin polimerizasyon süreci termoplastiklerden farklı olarak geri dönüşü olmayan bir süreçtir. Yüksek sıcaklıklarda dahi yumuşamazlar. Çoğu termoset matris sertleşmemeleri için dondurulmuş olarak depolanmak zorundadır. Dondurucudan çıkarılıp oda sıcaklığında bir müddet (1-4 hafta arası) bekletildiğinde sertleşmeye başlar ve özelliklerini kaybederek biçim verilmesi zor bir hâl alıp kullanılamaz duruma gelir. Dondurucu içinde olmak şartıyla raf ömürleri ise 6 ila 18 ay arasında değişmektedir. Termoset reçineler kimyasal etkiler altında çözülmez ve olağandışı hava şartlarında dahi uzun ömürlü olmaktadırlar. Termoset matris malzemelerin üretiminde kullanılan malzeme tipleri epoksi, polyester, vinylester, ve fenolik reçinelerdir (Tablo 2.1). Yüksek mukavemet gerektirmeyen durumlarda en çok kullanılan matris malzemesi polyester reçinesidir. Gelişmiş kompozitlerin üretiminde ise genellikle epoksi ve fenolik reçine kullanılmaktadır [2].

Çizelge 2.1 : Bazı Plastik Matris Malzemelerinin Özellikleri[3]

Özellikler	Epoksi	Polyester	Fenolik
Özgül ağırlık g/cm^3	1,1-1,4	1,2	1,2-1,3
Elastik modül	2-3,5	2-3	5-11
Çekme mukavemeti(MPa)	50-90	50-60	50-60
Kopma uzaması(%)	2-6	2-3	1,2

2.1.1.1. Epoksi Reçine Matrisler

Epoksiler iki ya da daha fazla epoksi içeren bileşenlerden oluşurlar. Polifenol' ün epikloridin ile bazik şartlarda reaksiyonu sonucu elde edilirler. Viskoz ve açık renkli bir sıvı halindedirler.

Epoksilere uygulanan kür işlemleri ile yüksek sıcaklıklara dayanımları 150-200ºC'a arttırılabilir. Saydam ve yapışkan hal amorf polimerlerin karakteristiğidir. Tüm

polimerler düşük sıcaklıklarda saydamlaşırlar ve yüksek sıcaklıklarda kauçuklaşırlar. Geçişin meydana geldiği sıcaklık aralığına "Camsı geçiş sıcaklığı " adı verilir. Camsı geçiş sıcaklığı maksimum çalışabilme sıcaklığının bir ölçüsüdür. 100 ºC' a arttırılabilir. 150-250 ºC arasında uygulanacak bir kür ile 150-250 ºC arasında maksimum çalışma sıcaklığı sağlanabilir. Kür işlemleri uygun katalizörlerin kullanılması ile hızlandırılabilir [3].

Epoksilerin avantajı ve dezavantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir [2,3];

Avantajları:

- Kopma mukavemetleri yüksektir.
- Elyaf yapılarla yüksek bağ mukavemeti sağlarlar.
- Yüksek aşınma direncine sahiptirler.
- Uçucu değildirler ve kimyasal dirençleri yüksektir.
- Düşük ve yüksek sıcaklıklarda sertleşebilme özelliğine sahiptirler.
- Sertleşme esnasında düşük oranda çekme gösterirler.

Dezavantajları:

- Polyesterle karşılaştırıldığında yüksek maliyetlidir.
- Polyestere oranla yüksek viskoziteye daha az uygundur.

2.1.1.2. Polyester Reçine Matrisler

Polyester matrisler dizabik asitlerin, dihidrik alkoller (glikol) ya da dihidrik fenollerle karışımının yoğuşması ile şekil alırlar. Polyesterin ana tipleri, polyester bileşeninin doymuş asitle ya da alternatif malzeme olarak glikolle modifikasyonu temeline dayanır. Ayrıca kür işlemi ile matrisin esnekliği iyileştirilerek kopma gerilmesi artırılabilir [3].

Polyester reçine denizcilik ve inşaat alanında en çok kullanılan termoset reçinedir. Kompozit malzemelerde kullanılan 2 tür polyester reçine vardır; daha ekonomik olan ortoftalik ve suya dayanım gibi daha iyi özelliklere sahip olan isoftalik polyester. Polyester reçinelerini polimerizasyon süreçlerinin tamamlaması için katalizör ve hızlandırıcı olarak adlandırılan ek maddelere ihtiyaç duyarlar [4].

Polyester matrislerin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir [3];

Avantajları:

- Takviyelerin neminin kolayca dışarı atılabilmesine izin veren düşük viskozite.
- Düşük maliyet.
- Çeşitli uygulamalar için geniş bir sınır içinde kolay imal edilebilirlik.
- İyi çevresel dayanım.

Dezavantajları:

- Kür sırasındaki yüksek egzotermik reaksiyon zayıf elyaf/matris bağı mukavemetine neden olur.
- Sistem gevrekleşmeye eğilimlidir.
- Çok seyreltik alkalilere bile zayıf kimyasal direnç gösterir.

2.1.1.3. Vinylester Reçine Matrisler

Polyesterlere benzerler. En önemli avantajları elyaf ve matris arasında iyileştirilmiş bir bağ mukavemetine sahip olmalarıdır. Polyesterde glikolün bir kısmının yerine doymamış hidrasilik bileşenlerin kullanılması ile elde edilirler [3]. Son derece yüksek kimyasal ve çevresel dayanıma sahip olup, mekanik özellikleri ve maliyeti polyester reçineden daha yüksektir. Ayrıca sertleşme sırasında yüksek oranda çekme görülür [2].

2.1.1.4. Fenolik Reçine Matrisler

Fenolik reçinelerin en büyük avantajı yüksek sıcaklık dirençleridir. Fenolik reçineler bölüm 2.2' de ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

2.1.2. Termoplastik Matrisler

Termoplastik polimerlerinin çeşitlerinin çok fazla olmasına rağmen matris olarak kullanılan polimerler sınırlıdır. Termoplastikler düşük sıcaklıklarda sert halde bulunurlar ısıtıldıklarında yumuşarlar (Tablo 2.2). Termosetlere göre matris olarak kullanımları daha az olmakla birlikte üstün kırılma tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geri dönüşüm kapasitesi ve sertleşme prosesi için organik çözücülere ihtiyaç duyulmamasından dolayı güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır. Bunun yanı sıra şekil verilen termoplastik parça işlem sonrası ısıtılarak yeniden şekillendirilebilir. Oda sıcaklığında katı halde bulunan

termoplastik soğutucu içinde bekletilmeden depolanabilir. Termoplastikler yüksek sertlik ve çarpma dayanımı özelliğine de sahiptirler. Yeni gelişmelerle termoplastiğin sağladığı bu artı değerleri son dönem termoset matrislerinden 977-3 Epoksi ve 52450-4 BMI reçineleri de sağlamaktadırlar [2].

Çizelge 2.2 : Çeşitli termoplastiklerin erime ve maksimum işlem sıcaklıkları [2].

Malzeme	**Erime sıcaklık aralığı (°C)**	**Maksimum işlem sıcaklığı (°C)**
PP	160-190	110
PA	220-270	170
PES- poli eter sülfon	-	180
PEI- polieterimid	-	170
PAI- poliamid imide	-	230
PPS- polfenilen sulfit	290-340	240
PEEK- polieter eter keton	350-390	250

Termoplastiklerin kompozit malzemelerde matris olarak tercih edilmemelerinin başlıca nedeni üretimindeki zorlukların yanı sıra yüksek maliyetidir. Oda sıcaklığında düşük işleme kalitesi sağlarlar, bu onların üretimde zaman kaybına yol açmasına neden olur. Bazı termoplastikleri istenilen şekillere sokabilmek için çözücülere ihtiyaç duyulabilir. Termoplastiklerin, termosetlere kıyasla hammaddesi daha pahalıdır [2].

Başlangıçta amorf yapılı reçinelerden polietersulfon (PES) ve polieterimid (PEI) matris olarak kullanılmaktaydı. Sonraki dönemde ise havacılık sektörü uygulamaları için çözücülere karşı dayanım önemli bir kriter olarak ortaya çıkmıştır. Bu ihtiyaç sonrasında Polietereterketon (PEEK) ve Polifenilen sulfit (PPS) gibi yarı-kristal yapılı plastik malzemeler geliştirilmiştir. Ayrıca sınırlı oranlarda Poliamidimid (PAI) ve Poliimid gibi plastiklerde kullanılmaktadır. Bu polimerler diğer termoplastiklerden farklı olarak polimerizasyonlarını kür aşamasında tamamlarlar. En yoğun çalışmalar ise PA, PBT/PET ve PP gibi düşük sıcaklıklarda kullanılan polimerlerin üzerine yapılmıştır. Tüm bu polimerlerin haricinde ABS, SAN, SMA (StirenMaleikAnhidrit), PSU (Polisülfon), PPE (Polifenilen Eter) matris olarak kullanılır [2].

Termoplastik reçineler malzemenin çekme ve eğilme dayanımlarının artırılması için kullanılırlar. Otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan termoplastikler uçak sanayisinde de yüksek performanslı malzeme çözümlerinde kullanılmaktadırlar. Çoğunlukla enjeksiyon ve ekstrüzyon kalıplama yöntemleri ile üretilen termoplastiklerin üretiminde GMT (Glass Mat Reinforced Thermoplastics / Preslenebilir Takviyeli Termoplastik) olarak da üretilmektedir Bu yöntemle hazırlanan takviyeli termoplastikler soğuk plakaların preslenebilmesi ve geri dönüşüm sürecine uygunluğundan dolayı özellikle otomotiv sektöründe tercih edilmektedir [2].

2.2. Fenolik Reçineler

Fenolikler termoset reçineler olup, fenolün bir aldehitle (genellikle formaldehit) katalizör yardımıyla reaksiyonu sonucu üretilirler. Fenolik reçineli kompozitler, ateşe karşı yüksek direnç, uzun süreli kullanım dayanıklılığı, yüksek sıcaklık ortamında mükemmel dayanım ve hidrokarbon ve klorlu çözücülere karşı direnç özellikleri gösterirler [5].

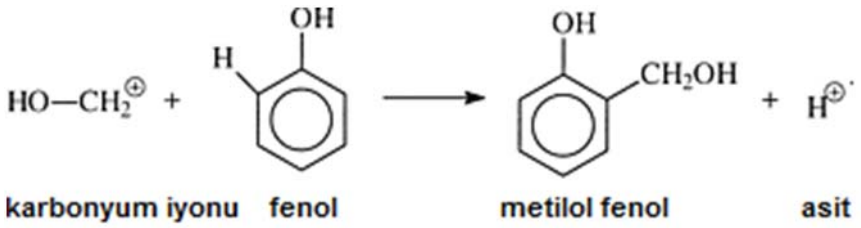
Fenolün aldehitle reaksiyonunda kullanılan katalizatör ve kullanılan formaldehitle fenolün oranı üretilen reçinenin türünü belirler. Üretilen fenolik reçine, asit katalizatörle üretilmişse ve formaldehit / fenol molar oranı 0,9 dan küçükse novolak olarak adlandırılır. Eğer reçine alkali katalizatörle üretilmiş ve formaldehit / fenol molar oranı 0,9'dan büyük ise resol olarak adlandırılır. Novolakların sentezinde oksalik ve sülfürik asit kullanılır. Resollerde ise hidroksit, sodyum, lityum,

potasyum, baryum ve kalsiyum elementlerinin hidroksitleri veya alifatik aminleri kullanılır. Novolakların ve resollerin ikisi için de suda %37-52 formaldehit çözeltisi (metilen glikol), $CH_2(OH)_2$ kullanılır [6].

Novolak sentezinde ilk reaksiyon, asit katalizatörün metilen glikolle reaksiyonu sonucunda karbonyum iyonu oluşumudur. Karbonyum iyonu daha sonra fenolle reaksiyona girerek metilolfenol oluşturur (Şekil 2.1) [6].

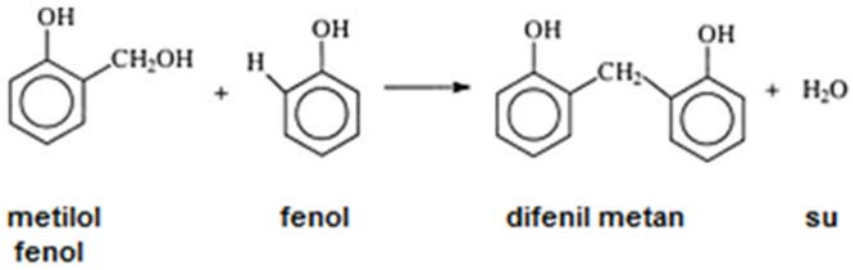
$$HO–CH_2\text{-}OH + H^+ \rightarrow HO\text{-}CH^+_2 + H_2O \quad \textbf{(2.1)}$$

Metilen glikol — asit — karbonyum iyonu — su



Şekil 2.1 : Karbonyum iyonu ile fenolün reaksiyonu sonucu metilolfenol oluşumu [6].

Asidik ortamda metilol grubu aşırı derecede kararsız durumdadır ve hemen ek bir fenolle reaksiyona girip novolak oluşturur (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 : Metilolün fenolle reaksiyonu sonucu novolak oluşumu [6].

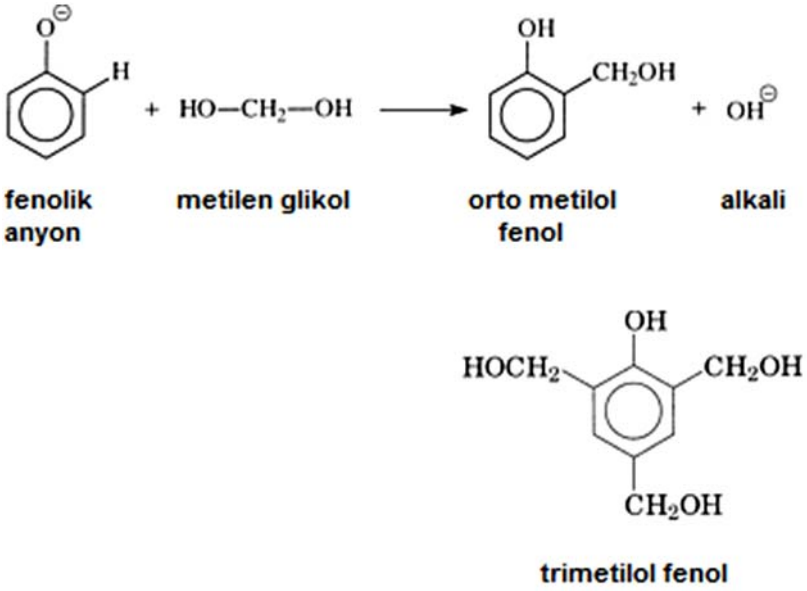
Difenil metan en düşük moleküler ağılığa sahip novolaktır. Novolaklar termoplastik reçinelerdir ve termoset olmaları için heksametilentetramin (HEXA) ile reaksiyona girmeleri gerekir ve bu reaksiyonun oluşması için ısıya ihtiyaç vardır.

Aşağıda ise fenole formaldehit eklenmesiyle hidroksimetil fenol oluşumu sağlayan resol prosesi görülmektedir.

$$C_6H_5OH + NaOH \rightarrow C_6H_5O^- + Na^+ + H_2O \qquad \textbf{(2.2)}$$

fenol — fenolik anyon

Bu reaksiyondan sonra fenolik anyon suyla karıştırılmış formaldehitle (metilen glikol) reaksiyona girerek metilolfenol oluşturur (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : Fenolik anyonun formaldehitle reaksiyonu sonucu metilolfenol oluşumu [6].

Fenolik reçinelerin çok yönlülüğü ve geniş kullanım alanları novolak ve resol reçinelerin farklı şekillerde pazarlanmasını beraberinde getirerek, toz, sıcak eriyik, çözücü bazlı ve sulu çözelti gibi formlarda piyasaya sunulmalarını sağlamıştır.

Novolak HEXA karışımı tozlar genellikle döküm kalıpları, öğütme merdaneleri gibi alanlarda kullanılmaktadır. Resol fenolik reçineler ise fiber takviyeli kompozit üretimi için kullanılmaktadırlar.

Fenolik reçinelerin ısı kalkanı amaçlı, cam ve karbon fiberli kompozitlerde kullanılma miktarı giderek artmakta olup bunun nedeni diğer termoset reçinelerle karşılaştırıldığında fenolik reçinenin alev ortamında alev yayılmasının yavaş olması,

az miktarda duman oluşturması ve bu dumanın toksik özelliğinin düşük olmasıdır. Bu avantajlarının yanı sıra fenolikler diğer reçinelerle kıyaslandığında daha ucuzdurlar. Tablo 2.3'de çeşitli termoset reçinelerin alev yayma endeksi ve duman yoğunluğu test sonuçları verilmiştir [6].

Çizelge 2.3 : Termoset reçinelerin alev yayılma endeksi ve duman yoğunluğu testi karşılaştırması.(ASTM E 84 tünel testi)[6].

Termoset reçine türü	**Alev yayma endeksi**	**Oluşan duman yoğunluğu**
Fenolik	10	10
Halojenleştirlmiş polyester	15	600-800
Halojenleştirlmiş vinil ester	45	600-800
Metakrilat vinil ester	20	40

1980'li yıllarda Federal Havacılık Kurumu, hava ulaşımı araçları için olan yanma anında toksik duman yayma ve alev yayılma spesifikasyonlarını sıkılaştırdı. Bunun amacı uçak yangınlarında yangının yayılmasını yavaşlatmak ve yolcuların tahliye edilebileceği süreyi arttırmaktı. Bu spesifikasyonları sağlayabilen kompozit türü ise cam veya karbon fiber takviyeli fenolik kompozitler olmuştur. Günümüzde fenolik kompozitler uçakların iç duvar, tavan ve yer kaplamalarında kullanılmakta ve geleneksel polyester, epoksi ve vinil ester reçineli kompozitlerin yerini almaktadır. Bu konunun önemi İngiltere'de King's Cross istasyonunda çıkan metro yangınında da görülmüştür. Yangında 31 kişi ölmüş, yüzlerce kişi yaralanmış ve bunun sonucunda İngiltere hükümeti yeni bir kanun çıkartarak (BS 6853), yer altı taşımacılığında kullanılan kompozit malzemeler için alev yayılması ve duman yoğunluğu konularında katı sınırlamalar getirmiştir. Bunu sınırlamaları geçebilen kompozitler ise Georgia - Pacific ve Borden Cellobond firmalarının ürettiği fenolik kompozitler olmuştur. Daha sonra Fransa ve İskandinav ülkeleri metroları da bu sınırlamaları takip ederek fenolik kompozit malzeme kullanımına geçmişlerdir [7].

3. POLİMERİK KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Polimer matrisli kompozitlerde, kullanılan matris ve pekiştiriciye ek olarak, kullanılan üretim yöntemi de malzemenin nihai özelliklerinde rol oynar. Kalıplanacak parçanın geometrik şekli, boyutu, reçine türü ve özellikleri, pekiştirici formu ve malzemeden beklenilen özellikler proses seçimini etkileyen faktörlerdir[8].

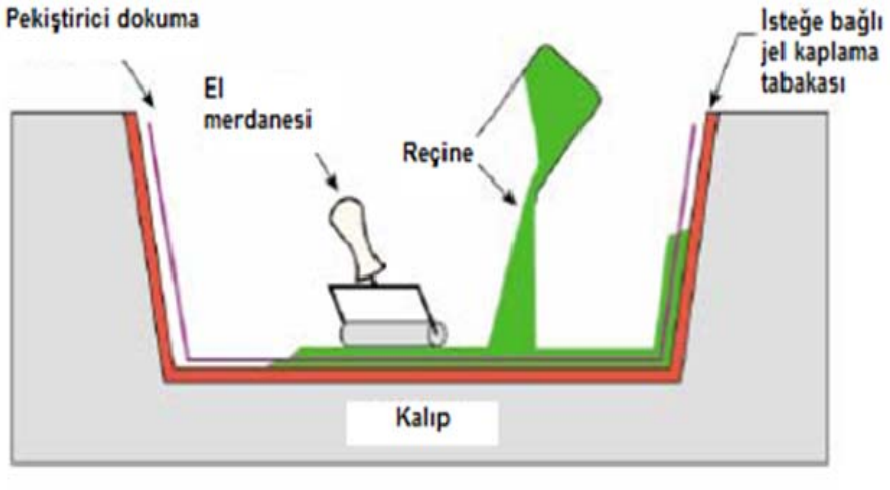
Polimer matrisli kompozitlerin üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntemler bu bölümde belirtilmiştir.

3.1. Elle Kalıplama

Bu yöntem, keçe, örgü, kumaş formundaki pekiştiriciler açık bir kalıba yatırılıp, yüzeylerine reçine emprenye edilerek uygulanır. Kalıplanmış parça normalde oda sıcaklığında sertleşir, ancak sertleşmeyi hızlandırmak için sıcaklık uygulanabilir.

Elle kalıplama tekniğinde önce açık bir kalıp hazırlanır. Yüksek kaliteli bir yüzey elde etmek için ilk pekiştirici tabakadan önce kalıp yüzeyine jel kaplama tabakası uygulanır. Daha sonra pekiştirici tabaka kalıba yerleştirilip yüzeyine reçine sürülür. Kalıplama işleminde tabakalar arasında kalan havayı dışarı çıkarmak için el merdaneleri ile yüzeye baskı yapılır. Ayrıca elle kalıplama işlemi vakum altında da yapılabilir [8].

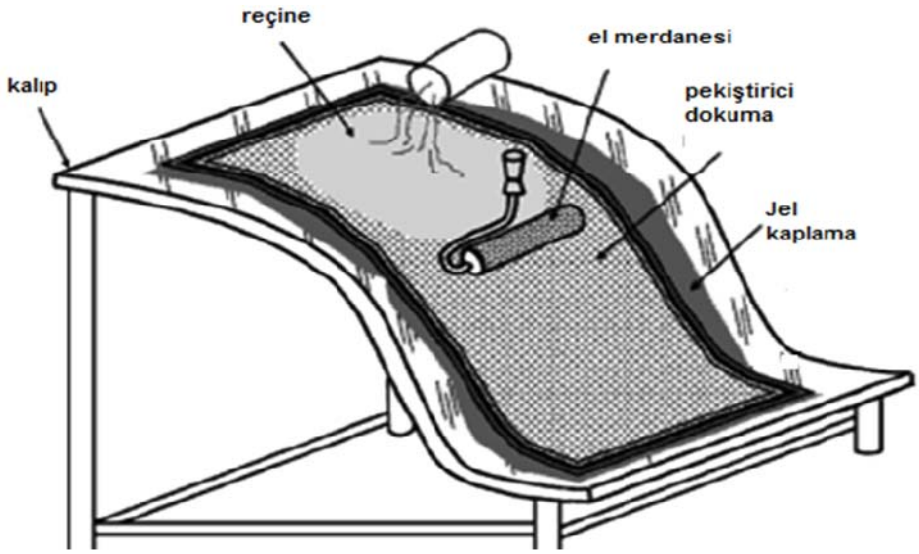
Bu yöntemde reçinenin pekiştiriciye iyi nüfuz etmesi önemlidir. Elle kalıplama tekniğinde en çok kullanılan polyester ve epoksi ile birlikte vinil ester ve fenolik reçineler de tercih edilmektedir. Elle kalıplama yoğun isçilik gerektirmesine rağmen düşük sayıdaki üretimler için uygun bir yöntemdir. Şekil 3.1’de elle kalıplama yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1: El ile kalıplama yönteminin şematik gösterimi [9].

Kalıba uygun olarak, keçe, kumaş veya dokuma önceden kesilerek hazırlanır. Kesilmiş hazır parçalar jelcot tabakası kurumadan kalıp üzerine yayılır ve üzerine fırça yardımı ile daha önceden hazırlanmış polyester karışımı, takviye malzeme yayılır ve fırça ile hafif darbelerle keçeye veya kumaşa emdirilir. Kumaşın (veya keçenin) polyesteri geçirmeyecek kadar kalın olması halinde, polyesterin bir kısmı daha önceden jelcot üzerine yayılır ve daha sonra üzerine takviye malzemesi konulur. Boyuna ve enine dişli rulolar yardımı ile arada kalan hava kabarcıkları çıkarılır ve istenen kalınlığa ulaşılana kadar takviye elemanı ve polyester tatbikine devam edilir. Bu yöntemde, hava kabarcıklarını çıkarma işlemlerine ne kadar çok dikkat ve özen gösterilirse, mamul malzeme de o kadar hatasız ve mukavim olur. Ürün belli bir sertliğe ulaştığında kalıptan çıkarılabilir.[10]

Şekil 3.2’ de görüldüğü gibi şekilli kalıplar kullanılarak farklı şekillerde parçaların üretim mümkündür.



Şekil 3.2 : El ile kalıplama yöntemi şematik gösterimi [9].

Elle kalıplama uygulamalarına örnek olarak sandallar, radar kılıfları, borular, tanklar otomobil parçaları, düz ve oluklu levhalar gösterilebilir [8].

Elle kalıplama yönteminin avantajları [9];

- Düşük kalıp ve ekipman giderleri,
- Büyük parçaları üretme imkanı,
- Malzeme ve ekipman seçeneğinin fazla olmasıdır.

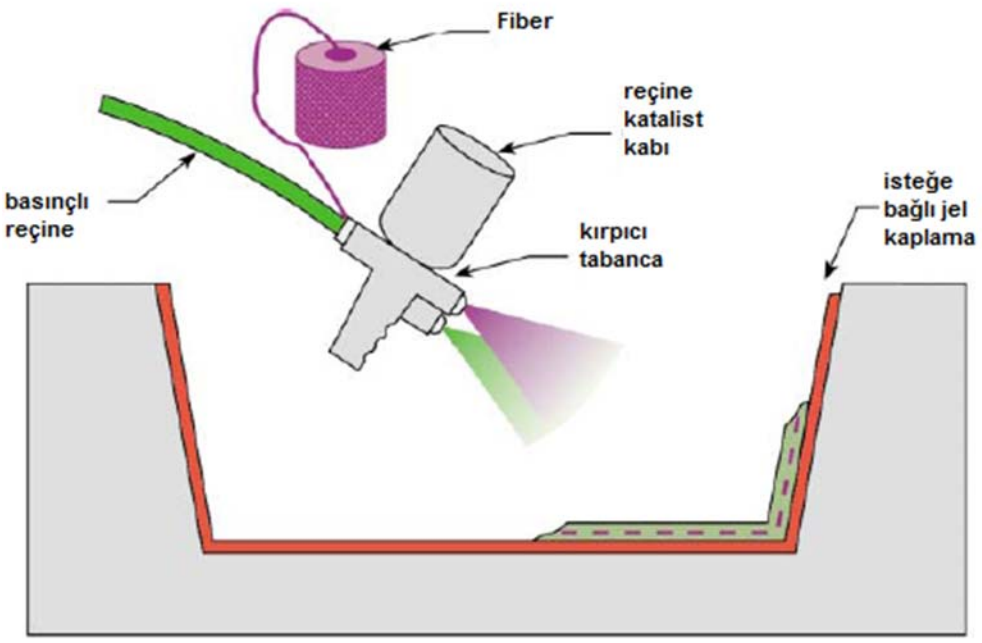
Elle kalıplama yönteminin dezavantajları [9];

- Nihai kompozitin kalitesi işlemi gerçekleştiren kişinin yeteneğine bağlıdır.
- İşlem esnasında sağlık ve güvenlik önlemleri alınmalıdır.
- Bu yöntemde kullanılacak reçinenin viskozitesinin düşük olması uygundur, bu da sonuç kompozitin mekanik ve termal özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir.

3.2. Spreyle Kalıplama Yöntemi

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan yöntemlerden biri olan spreyleme prosesi diğer üretim yöntemlerine göre daha ekonomik ve daha hızlıdır. Spreyleme prosesinde takviye elemanı ve reçineyi püskürtmek için sprey tabancası kullanılır. Kalıp içerisine püskürtülen takviye elemanı malzemeleri olarak cam fiber ya da karbon fiber kırpılmış olarak eklenebilir. Ayrıca reçinenin daha hızlı

katılaşması için katalist ilavesi spreyleme işlemi esnasında yapılabilir. Sprey tabancası kompozit malzeme üretimi sırasında kullanılan fiberleri daha önceden belirlenmiş uzunluklarda (10-40 mm) eş zamanlı olarak kırparak reçinenin içinden itilmesini sağlar [11]. Spreyleme prosesi şematik olarak Şekil 3.3'de gösterilmektedir.



Şekil 3.3 : Spreyleme prosesinin şematik görünümü [12].

Takviye malzemesi olarak en çok E-camı, bunun yanı sıra da karbon fiber ve kevlar da kullanılmaktadır. Bu proseste takviye elemanının ağırlık oranı, kompozit malzemenin toplam ağırlık oranına göre yaklaşık %20-40 arasında olmalıdır.

Spreyleme sırasında sıvı reçine atomize olarak ince partikül parçalarına ayrılması gerekmektedir. Bu şekilde düzgün spreyleme deseni oluşturulabilir. Bunun içinde gerekirse çözücü ile karıştırılır [11].

Spreyleme prosesinde kalınlık, spreyleme desenine ve operatör yeteneğine göre değişebilir. Malzeme kalıba spreylendikten sonra fiberin iyi ıslanması ve içindeki havanın çıkarılması için fırça ya da merdaneler kullanılır.

Temel İşlem Aşamaları [11];

1- Kurutulmuş parçanın kalıptan rahatlıkla çıkarılması için kalıp yüzeyi mumlanır ya da parlatılır.

2- Jelatinli koruyucu tabaka kalıp yüzeyine uygulanır. Tabakalar spreylenmeden önce kurutulması sağlanır.
3- Reçine, katalist ve kırpılmış fiber kalıp yüzeyine sprey tabancası ile püskürtülür. Kompozitin her bölgesinde aynı kalınlığı yakalamak için spreyleme belirli bir şekle göre yapılır.
4- Fiberin reçine tarafından iyi ıslatılabilmesi için merdane kullanılır.
5- Tabaka fırında kürlenir.
6- Elde edilen parça kalıptan ayrılır ve gerekiyorsa son işlemler yapılır.

Spreyleme prosesinin avantajları;

- Küçük ve büyük parçalar için ekonomik bir prosestir.
- Kullanılan cihaz ve hammaddeler ucuza mal edilecek malzemelerdir.

Spreyleme prosesinin sınırlamaları;

- Yüksek yapısal dayanımın gerekli olduğu parçaların yapımı için uygun değildir.
- Proses sırasında kalınlık ve fiber hacim oranını kontrol etmek zordur. Bu parametre operatörün yeteneğine bağlıdır. Ayrıca homojen kalınlık ve sabit püskürtme hızı için otomasyon sisteminden de yararlanabilinir.
- Prosesin sonunda parçanın bir yüzeyi çok düzgün olmasına rağmen diğer yüzeyi bu kadar düzgün olmayabilir.
- Boyutsal hassasiyetin önemli olduğu durumlarda tercih edilmez.

Bu yöntemin kullanıldığı uygulama alanlarına örnek olarak botlar, otomobil ve kamyon parçaları, büyük paneller, mobilya ve değişik ev aletleri verilebilir [8].

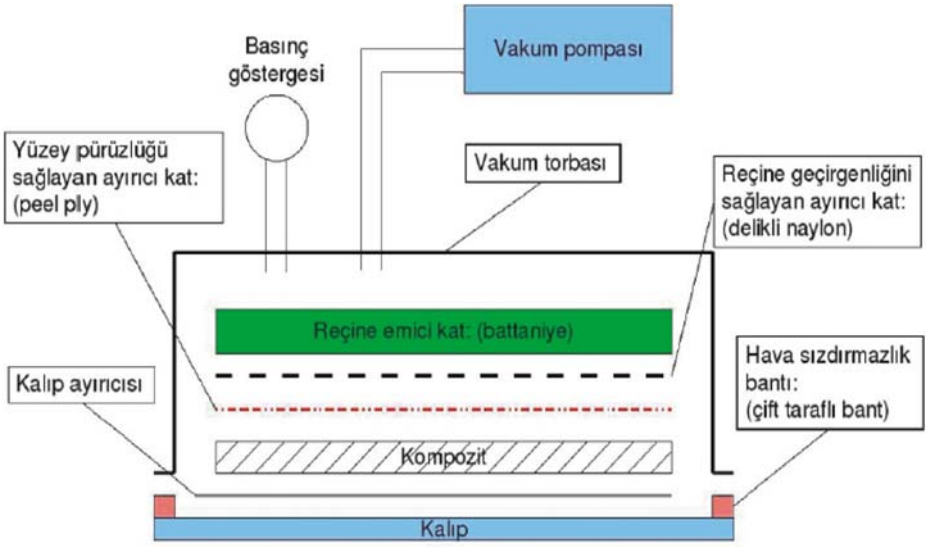
3.3. Vakum Torbalama Yöntemi

Vakum torbalama üretim tekniği esas itibarı ile lifli kompozit kumaş malzemesinin bir kalıp içerisine yatırılması ve reçinenin elle kalıp içine dağıtılması sürecinden sonra devreye alınan bir uygulamadır. Vakum torbalama üretim metodu klasik olarak uygulanan elle kalıplama yöntemi ile kompozit üretimi metodunun dezavantajlarını ortadan kaldırarak daha sağlam ve daha hafif kompozit üretimini mümkün kılmaktadır [13].

Vakum torbalama tekniğini elle kalıplama yönteminden ayıran asıl fark işlemin vakum altında yapılmasıdır. Vakum uygulamasının elle yatırma göre sahip olduğu avantajlar ve nedenleri aşağıda belirtilmiştir [13].

- Üretilen katmalı kompozit yapı içinde hava kabarcıklarının neden olduğu boşluklar en aza indirilmekte ve bu sayede çatlak oluşma kaynakları yok edilerek, yapının mukavemeti önemli ölçüde artmaktadır.
- Vakum uygulaması sonucunda katmanlı yapı içinde kalan fazla reçine emilerek, yapının lif-reçine oranının artması sağlanmaktadır.
- Vakum uygulaması sayesinde reçinenin bütün katmanlar arasında daha iyi yayılması sağlanmakta ve bu sayede daha homojen bir reçine dağılımı elde edilmektedir. Homojen reçine dağılımı ise, yapının mukavemetinin hesaplanabilir olmasını sağlamaktadır. Böylece sayısal ve analitik yöntemler yolu ile kompozit yapının mukavemeti daha doğru olarak hesaplanabilir.
- Vakum uygulaması sırasında katmanlar birbirleri üzerine basacaklarından, katmanların birbirleri ile olan birleşim mukavemeti daha güçlü olacaktır. Bir başka deyişle katmanlar arası kesme mukavemeti artacaktır.

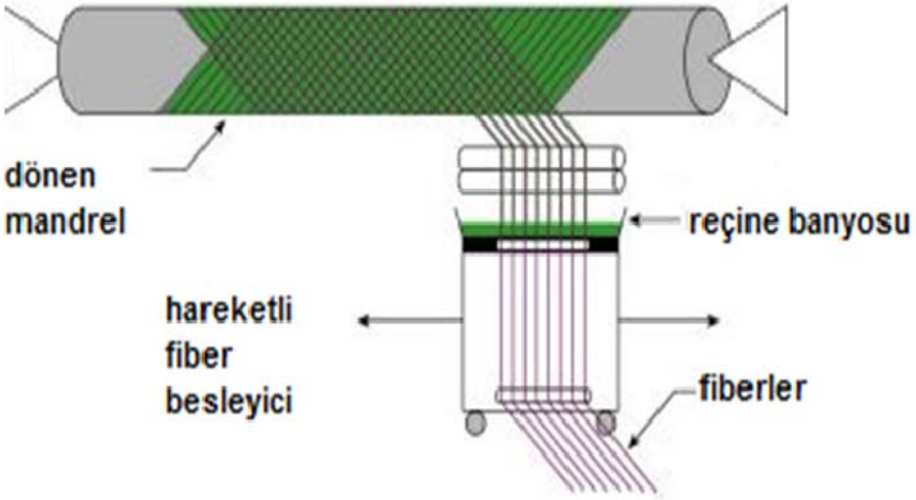
Yöntemin dezavantajı sayılabilecek yönü ise elle kalıplama yöntemine göre daha maliyetli olmasıdır. Şekil 3.4' de vakum torbalama yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi [13].

3.4. Filaman Sarma

Filaman sarma yöntemi genellikle içi boş, dairesel yada oval kesitli ürünlerin üretimi için kullanılır. Yöntem fiberlerin bir mandrel üzerine sarılmasıyla gerçekleşip, fiberler kuru olarak yada bir reçine banyosundan geçirilerek sarılabilir. Ürünün kalınlığı ve fiberlerin yönü, mandrelin dönüş hızına ve fiber besleme mekanizmasının hareketine göre değişkenlik gösterir. Yöntemin şematik gösterimi şekil 3.5' de görülmektedir.[14]

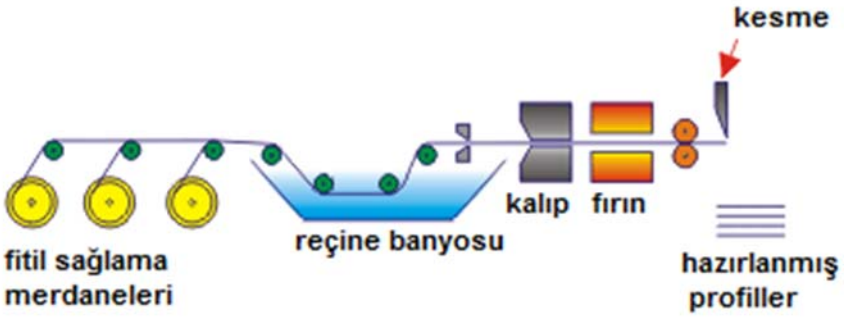


Şekil 3.5 : Filaman sarma yönteminin şematik gösterimi [14].

Bu yöntem kullanılarak boru, silindirik depo ve silolar üretilebilir.

3.5. Profil Çekme (Pultrüzyon)

Pultrüzyon tekniği metallerin ekstrüzyonuna benzer. Termoset reçine ile emprenye edilen sürekli fitil, şerit veya dokumaların seramik bir kalıptan çekilip sertleştirilmesiyle sabit kesitli değişik profiller, çubuklar, düz ve oluklu levhalar üretilebilir. Yüksek üretim hızına sahip olmasına karşın, reçinenin kalıba yapışma riski vardır ki bu da kalitenin bozulmasına yol açabilir [8]. Şekil 3.6'da pultrüzyon tekniği şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : Profil çekme yönteminin şematik gösterimi [15].

3.6. Preste Kalıplama

Preste kalıplama tekniğinde reçine ve pekiştirici karışımı, iki parçadan oluşan kalıplarda ısı ve basınç altında şekillenir. Preslemede kıyılmış fiberler, keçeler, fitiler, örgü ve kumaşlar kullanılabilir. Bu yöntemin avantajları:

- Üretim hızı yüksektir.
- Fiber-reçine oranı ve boşluk miktarı mükemmel bir şekilde kontrol edilebilir.
- Karmaşık şekilli parçalar dar boyut toleransları içinde kısa periyotlarla üretilebilir.
- Tüm parçalar aynı kalitede üretilebilir.
- Yüksek sertleşme basıncı nedeniyle malzeme özellikleri daha iyidir [8].

3.7. Enjeksiyon Tekniği

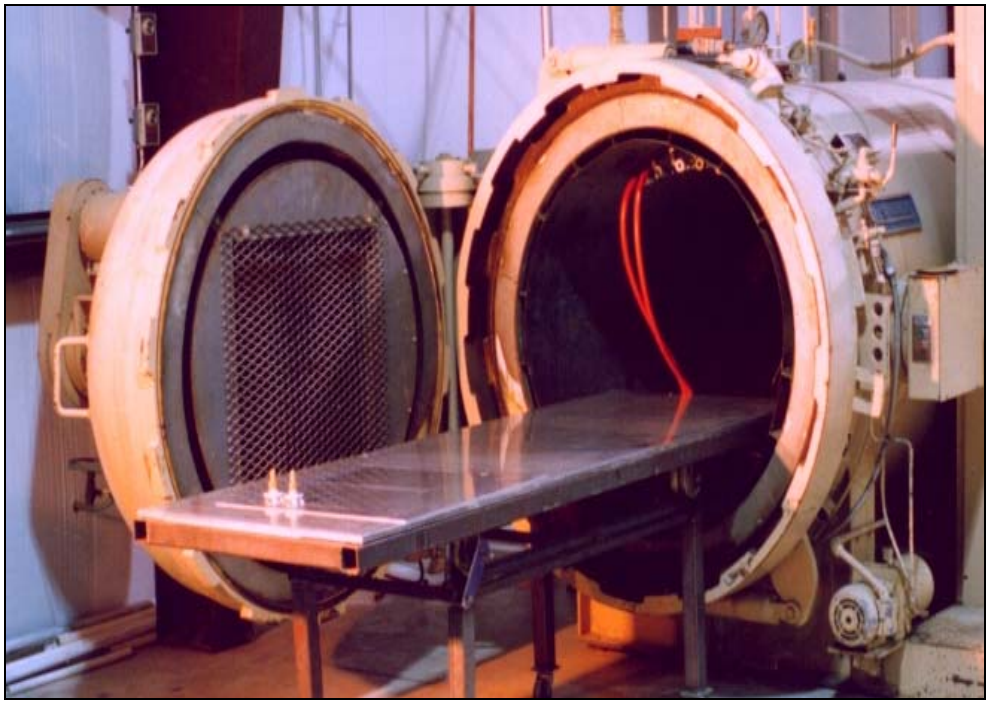
Fiber takviyeli termoplastiklerin büyük bir bölümü enjeksiyon tekniğiyle üretilir. Her bir kalıplama periyodunda birkaç gramdan 10 kg'a kadar değişen ağırlıklarda parçaları kalıplayabilen kapasitede enjeksiyon makinelerinin kullanılması mümkündür. Kullanılan malzeme termoplastik reçine süreksiz fiber karışımı şeklindedir [8].

3.8. Otoklav yöntemi

Termoset kompozit malzemelerin performanslarını arttırmak için elyaf/reçine oranını arttırmak ve malzeme içinde oluşabilecek hava boşluklarını tamamen gidermek gerekmektedir. Bu ise malzemeye yüksek ısı ve basınç uygulanarak sağlanabilir.

Vakum torbalama yöntemindeki gibi sızdırmaz bir torba ile elyaf/reçine yatırmasına basınç uygulanabilir. Fakat bir atmosferden fazla düzenli ve kontrol edilebilir bir basıncın uygulanabilmesi için dışsal basınca ihtiyaç duyulur. Bu uygulama için, otoklav yönteminde de uygulanan ve kompleks şekillerde en çok kontrol edilebilen metod, dışarıdan sıkıştırılmış gazın, kompozit malzemenin içinde bulunduğu kaba verilmesidir.

Otoklav basıncın, ısının ve emişin kontrol edilebildiği basınçlı bir kaptır (Şekil 3.7). Vakum torbalama yöntemi ile benzerdir. Fırın yerine bir otoklav kullanılır. Böylece özel amaçlar için yüksek kalitede kompozit üretebilmek için kür şartları tam olarak kontrol edilebilir. Bu yöntem diğerlerine oranla daha uzun sürede uygulanır ve maliyeti daha yüksektir [16].



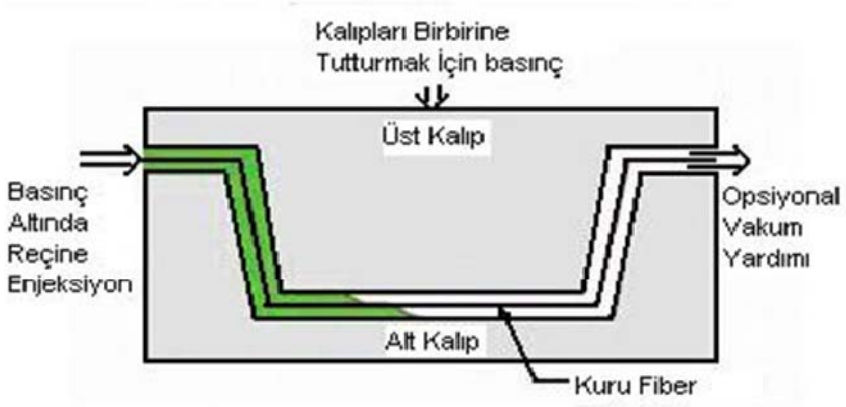
Şekil 3.7 : Otoklav yönteminin şematik gösterimi [16].

3.9. Savurma Kalıplama

Silindirik parçaların üretimi için uygun bir yöntemdir. Kırpılmış elyaf ve sertleştirici katılmış reçine, silindirik bir kabın içine doldurulur ve döndürülen kabın cidarlarına merkezkaç kuvvetler yardımıyla dağılan kompozit malzeme sıcak hava ile sertleştirilir [3].

3.10. Reçine Transfer Kalıplama

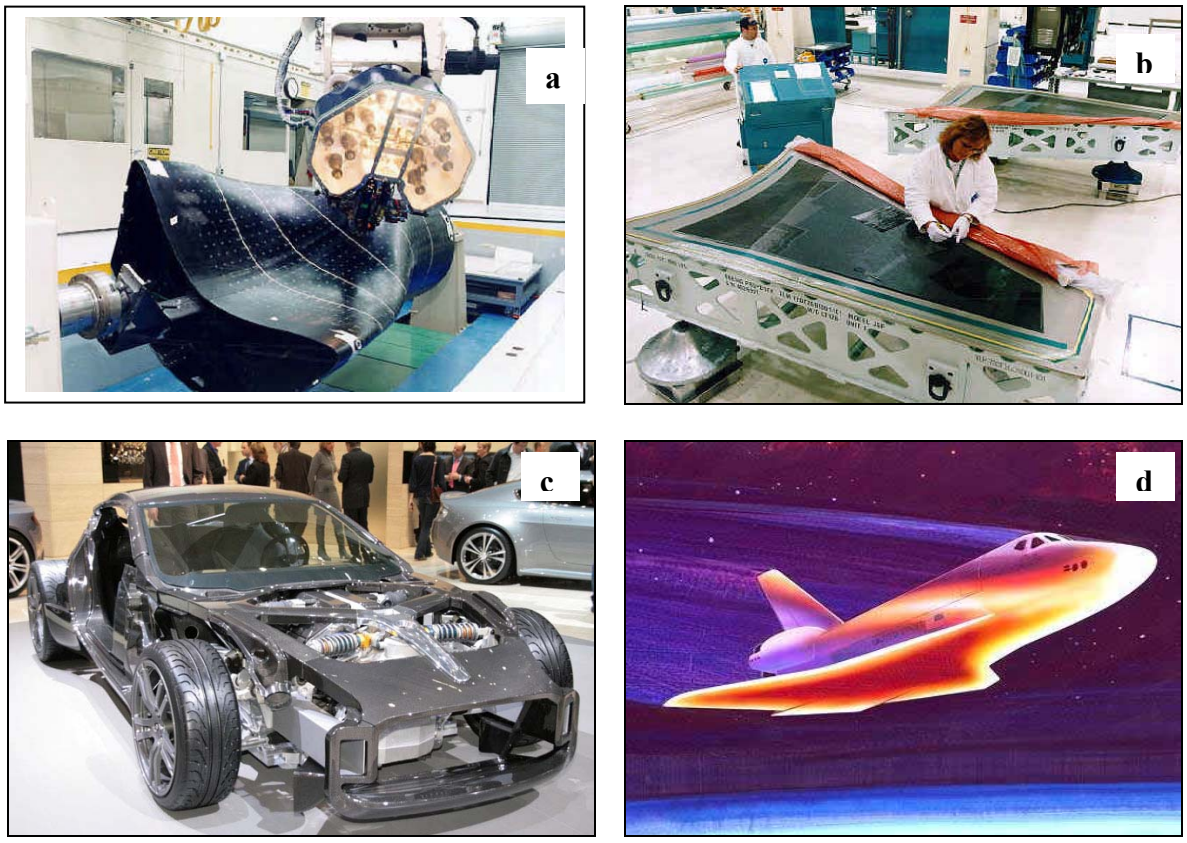
Bu kompozit üretim yönteminde el ile kalıplama gibi sistemlere göre daha hızlı ve uzun ömürlü olmakla birlikte iki parçalı kalıp kullanmak gereklidir. Kalıbın kompozit malzemeyle yapılması çelik kalıp maliyetine göre daha düşük kalmasına neden olmaktadır. RTM yöntemi çoğunlukla jelkotlu veya jelkotsuz her iki yüzeyinde düzgün olması istenen parçalarda kullanılır. Takviye malzemesi olarak kuru keçe, kumaş veya ikisinin kombinasyonu kullanılır. Takviye malzemesi önceden kalıp boşluğu doldurulacak şekilde kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Fiberler matris içinde geç çözünen reçinelerle kaplanarak kalıp içerisinde sürüklenmesi önlenir. Reçine basınç altında kalıba pompalanır (Şekil 3.8). Bu süreç daha fazla zaman ister. Matris enjeksiyonu soğuk, ılık veya en çok 80ºC'ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir. Bu yöntemde içerideki havanın dışarı çıkarılması ve reçinenin fiber içine iyi işlemesi için vakum kullanılabilir. Fiberin kalıba yerleştirilmesini gerektirmesinden dolayı uzun sayılabilecek bir işçilik gerektirir. Kalıp kapalı olduğu için ise zararlı gazlar azalır ve gözeneksiz bir ürün elde edilebilir. Bu yöntemle karmaşık parçalar üretilebilir [2].



Şekil 3.8 : Reçine transfer kalıplama yöntemi şematik gösterimi [2].

4. KARBON TAKVİYELİ KOMPOZİTLER

Karbon takviyeli kompozitler ilk olarak uzay araştırmalarında kullanılan roketlerde ve savaş jetlerinde kullanılmak üzere geliştirilen , istenilen yapısal , mekanik ve ısıl özelliklerin sağlayan hafif bir malzemenin bulunmasının ön planda olduğu , maliyetin ise ikinci planda tutulduğu araştırmalar sonucunda bulunan malzemelerdir. İlerleyen yıllarda karbon kompozitlerin üretim maliyetlerinin düşürülmesi sonucunda karbon kompozitler farklı yeni kullanım alanlarına hitap etmeye başlamıştır [17]. Karbon takviyeli kompozitler günümüzde uydu ve uzay araçları, spor ekipmanları, yarış otomobili ve spor otomobil parçaları, sivil ve askeri havacılık uygulamaları, deniz taşıtları, basınçlı depolama tankları gibi alanlarda kullanılmaktadır. Şekil 4.1'de karbon kompozitlerin kullanım alanlarından örnekler gösterilmiştir.



Şekil 4.1 :a) JSF savaş jeti motor hava emiş kısmı b) JSF savaş jeti kanat parçası, c) Spor otomobil monokok gövdesi d)Uzay mekiği ısı kalkanları

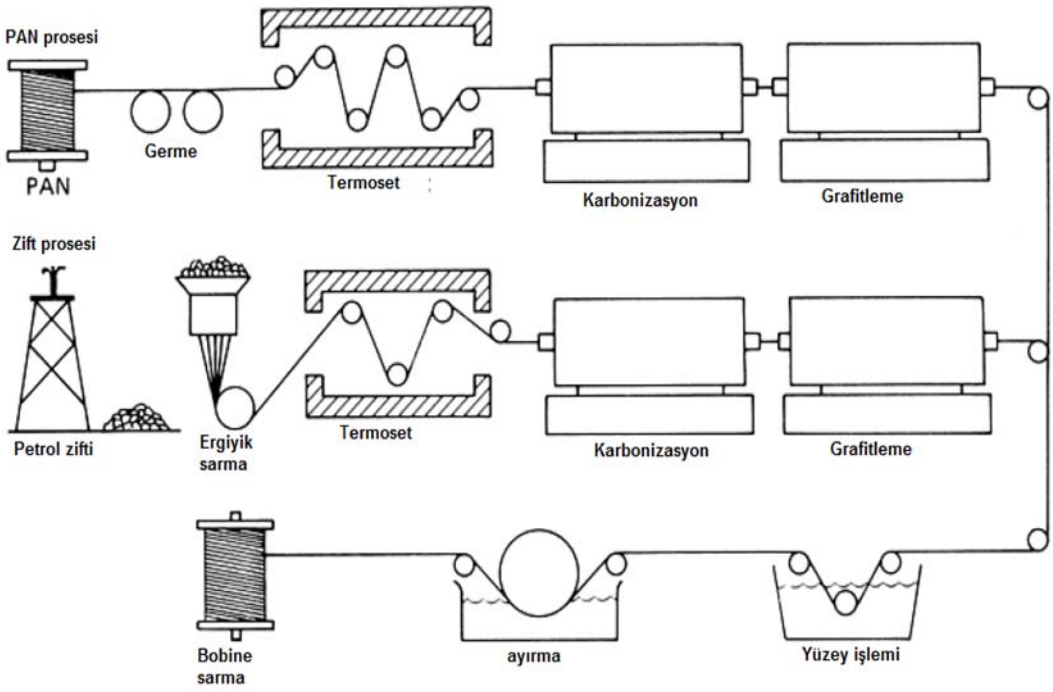
Malzemenin yüksek mukavemet, yüksek sertlik, aşınma direnci, yüksek sıcaklık dayanımı ve bunlarla birlikte düşük özgül ağırlık özelliği göstermesi ve bu alanlarda kullanılan geleneksel malzemelere oranla üstün bir malzeme olmasına rağmen üretim maliyetlerinin hala nispeten yüksek olması kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır.

4.1. Karbon Fiberlerin Üretimi

Karbon fiberlerin ticari olarak kullanımı, ilk olarak Thomas Edison'un pamuk ve bambu fiberlerinin karbonizasyonunu sağlayarak akkor filamanlı ampullerde kullanması kabul edilir. Fakat ilk gerçekçi kullanım 1950'li yılların sonunda başlayan, uzay roketlerinde geliştirilmiş ablatif malzeme arayışları sonucunda başlamıştır [18]. İlerleyen yıllarda maliyetlerin düşürülmesi adına çalışmalar yapılmış, üretim için gerekli alternatif hammaddeler bulunmuş ve günümüzde endüstriyel kullanıma uygun maliyete düşürülüp farklı alanlarda da kullanılmaya başlanmıştır [19].

Bir malzemenin dayanımının yüksek olması malzemedeki atomlar arası ve moleküller arası bağların kuvvetine bağlıdır. Karbon fiberin de özellikleri fiber mikroyapısına bağlı olup bu yapı, üretim yöntemine ve üretim yöntemindeki sıcaklık, zaman gibi parametrelere bağlı olarak çok değişkenlik gösterir. Örneğin aynı hammaddeden üretilen karbon fiberlerde farklı prosesler sonucu özellikler de çok farklı olabilmektedir. Aynı şekilde kullanılan hammadde de sonuç özellikleri değiştirebilir. Üretim, istenilen fiberin yüksek dayanımlı yada yüksek modüllü olmasına göre optimize edilir. Bununla birlikte üretim maliyetleri de göz önünde bulundurulur [20].

Karbon fiberlerin üretiminde kullanılan hammaddeler, kullanılma miktarlarına göre sırasıyla poliakrilonitril (PAN), zift ve suni ipektir. Hem hammaddeden üretim için üretim detayları farklı olsa da hepsi genel olarak sarma, stabilizasyon, karbonizasyon ve son olarak boyutlandırma aşamalarından geçer [21].



Şekil 4.2 : PAN ve arafaz ziftten karbon fiber üretiminin şematik gösterimi [21].

Şekil 4.2'de gösterilen proses dizilimiyle, PAN ve arafaz zift bazlı başlangıç fiberlerinden karbon fiber üretimindeki benzerlikler görülebilir.

Genel olarak PAN başlangıç malzemesi yüksek dayanımlı fiberler üretilmesini sağlarken, arafaz zift başlangıç malzemesi ile yüksek modüllü fiberler üretilir. Rayon bazlı fiberler ise daha ucuz maliyetli olmakla birlikte daha düşük dayanım ve modüle sahiptirler [20].

4.1.1. PAN Bazlı Fiberlerin Üretimi

Günümüzde kullanılan karbon fiberlerin büyük bir oranı PAN başlangıç fiberlerinden üretilmektedir. PAN fiberleri beyaz renkte ve yaklaşık 1.17 g/cm^3 yoğunlukta olup, molekül yapısı olarak yönlenmiş uzun zincirli moleküllerden oluşmaktadır. PAN fiberleri stabilizasyon aşamasında gerilerek oksijen ortamında 200 ila 300^0 C sıcaklıklara çıkarılır. Böylece moleküller yönlenme sağlanıp sonrasında çapraz bağlanarak sonraki piroliz aşamasında dekompozisyona uğramaktan kurtulurlar. Germe işlemi ise ısıl işlemler esnasında yüksek oranda yönlenmiş moleküler yapının

oluşmasına yardımcı olarak yüksek modüllü ve yüksek çekme dayanımlı fiberler elde edilmesini sağlar [21].

Standart ve orta seviyeli modüle sahip fiberlerin karbonizasyon işlemi fiberlerin inert atmosferde 1000 ila 1500^0C sıcaklığa çıkarılmasıyla yapılır ve fiberlerin karbon oranı yaklaşık %95 olur. Yüksek modüllü fiberlerin üretimi için karbonizasyondan sonra ek bir yüksek sıcaklık işlemi daha yapılır. Karbonizasyon işleminde fiberlerin çapları küçülür ve ağırlıklarının yaklaşık %50'sini kaybederler. Uzunlamasına büzülmeyle oluşan çap küçülmesi moleküler yönlenmeyi arttırarak mekanik özelliklerin de artmasına yardımcı olur [21].

Karbonizasyondan sonra fiberler bir yüzey işleminden geçirilerek yıkanır ve bu esnada fiber yüzeyine fonksiyonel grupların bağlanmasıyla, kullanılacak reçineyle olan bağlanma kuvveti arttırılabilir. Bağlanma kabiliyetini arttırmak için çoğu üretici bir elektrolitik oksidasyon prosesi kullanarak fiber yüzeyinde karboksil, karbonil ve hidroksil gruplarının gruplarının oluşmasını sağlar. Daha sonra fiberler bobine sarılarak proses tamamlanır [21].

Günümüzde PAN başlangıç fiberi olarak, geliştirilmiş tekstil türü PAN başlangıç fiberi kullanan üreticilerle, uzay uygulamaları için geliştirilmiş başlangıç fiberi kullanan üreticiler arasında farklılıklar vardır. Tekstil türü başlangıç fiberleri büyük ölçekli fiber üreticileri tarafından üretilir ve 200.000 filamandan oluşurlar . Sonrasında karbonizasyon işleminden geçirilip, yaklaşık 48.000 filamandan oluşan demetler halinde sarılırlar. Uzay uygulamaları için üretilen başlangıç fiberleri ise daha küçük ölçekli ve uzmanlaşmış tesislerde üretilip 3000 ila 12.000 filamandan oluşur. Bu fiberler ise karbonizasyondan sonra 24.000 veya daha fazla flamandan oluşan demetler halinde bobine sarılırlar. Tekstil türü başlangıç fiberlerinin kullanıldığı üretimde birim zamanda üretilen ürün daha fazla olduğundan üretim maliyetleri daha düşüktür ve bu fiberler endüstriyel uygulamalar için üretilir. Uzay uygulamaları için üretilen başlangıç fiberlerinin ise maliyeti daha yüksektir ve daha az flamandan oluştuğu için daha toplu halde bulunurlar [21].

4.1.2. Zift Bazlı Fiberlerin Üretimi

Ziftler aromatik hidrokarbonların bir bileşimidir ve petrol, kömür katranı,asfalt veya PVC'den üretilebilir [22]. Karbon fiber üretiminde başlangıç hammaddesinin seçimi, nihai ürün fiberlerin özellikleri bakımından önemlidir. Yüksek performanslı karbon

fiberler üretmek için, ziftler bir ön işlemden geçirilerek istenilen viskozite ve molekül ağırlığının elde edilmesi gerekir. Ön işlem görmüş ziftler arafaz denilen disk benzeri sıvı kristal bir faz bulundururlar ve bu faz yüksek performanslı fiberlerin elde edilesi için istenen, uzun dizilimli moleküllerden oluşmuş bölgeler oluşmasını sağlar. Ön işlem olmadan yapılan üretimde 50 GPa'dan daha düşük modüllü, düşük dayanımlı izotropik karbon fiberler elde edilir [23].

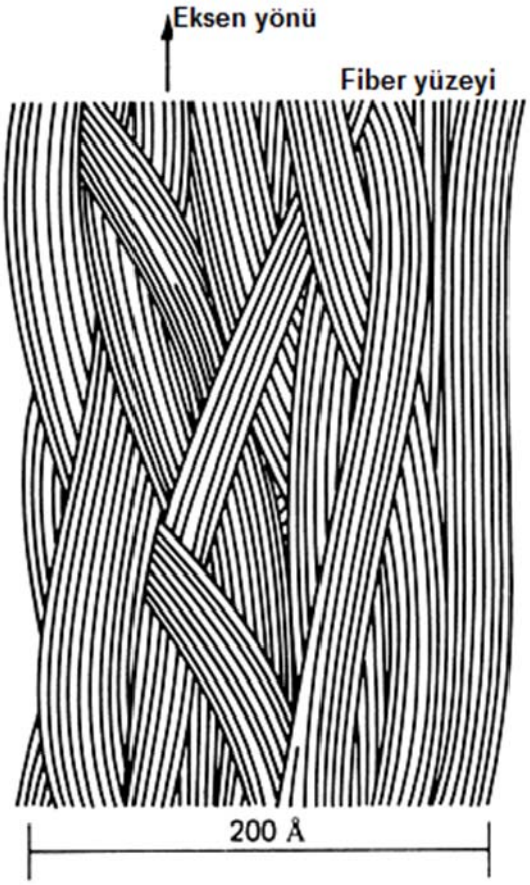
İplik haline getirildikten sonra kalan üretim aşamaları PAN bazlı fiberlere benzer şekilde olup, stabilizasyon, karbonizasyon, yüzey işlemi, boyutlandırma ve sarma işlemlerinden oluşur (Şekil 4.2). Fakat sıcaklık, zaman ve germe gibi proses parametreleri PAN bazlı fiberle üretimden farklılıklar gösterir. Ayrıca piroliz aşamasında yayılan gaz türleri de PAN ve zift bazlı fiberlerde farklıdır. Bununla birlikte arafaz zift fazlı fiberlerlerin başlangıç moleküler yapısının daha fazla yönlenmiş olmasında dolayı yüksek sıcaklık işlemlerine daha iyi cevap verirler. Örneğin aynı sıcaklıkta işlem görmüş arafaz zift bazlı fiberler PAN bazlı fiberlerden daha yüksek yoğunluk ve daha iyi termal ve elektriksel iletkenlik özelliklerine sahip olurlar [21].

4.2. Karbon Fiberlerin Özellikleri

Karbon fiberlerden üretilmiş kompozitler, 1020 çeliğinden beş kat fazla dayanıma sahip olup aynı zamanda beş kat hafiftirler. Benzer şekilde karbon fiber kompozitler 6061 alüminyumun yedi kat fazla dayanımına ve iki katı sertliğinde olup bir buçuk kat daha hafiftirler. Ayrıca karbon fiberler uygun reçinelerle kompozit haline getirildiklerinde bilinen tüm metallerden daha yüksek yorulma dayanımına ve korozyon direncine sahip olan malzemeler haline gelirler. Belirli arafaz zift bazlı karbon fiberler bakırdan üç kat fazla elektrik iletkenliğine sahiptir. Bu iletkenlik özelliğiyle karbon fiberler, bilgisayar ve elektronik cihazlarda statik elektrik yükünü dağıtmak için kullanılırlar. Yüksek sıcaklıkla yumuşamamaları ve erimemeleri bu kompozitleri roket nozulü, ısı kalkanları veya uçak fren sistemleri gibi yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun kılar. Hatta okside edici olmayan atmosferde, karbon fiberlerin yüksek sıcaklık dayanımları artış gösterir. Bu üstün özellikler fiber mikroyapısının bir sonucudur. Fiberlerin yapısı eksenel ve enine olmak üzere iki şekilde incelenebilir [21].

Eksenel yapı

Tek bir karbon filamanı, çapı 7 μm. olan uzun silindirler olarak düşünülebilir. Bu silindirde birbirine sarmalanan, küçük, dalgalı, şerit şeklinde kristalit yapılar vardır. Bu kristalitlerin uzunluğu ve düz veya dalgalı olması fiberin modülünü belirlemektedir. Şekil 4.3'te PAN bazlı karbon fiberin eksenel yapısı görülmektedir [21].

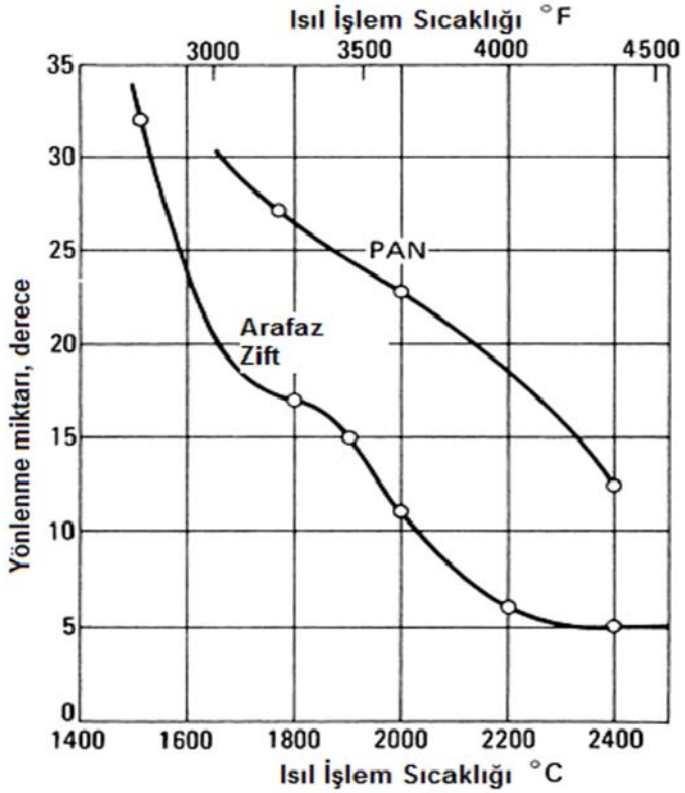


Şekil 4.3 : 400 GPa modüllü PAN bazlı karbon fiberin dalgalı şerit yapısı [21].

Daha yakından bakılacak olursa, her şerit benzeri kristalit birçok katmandan oluşur. Her katman ise karbon atomlarının tel örgü şeklinde dizilmesinden oluşur ve grafen düzlemi olarak adlandırılır. Bu her düzlemde bulunan karbon atomları arasındaki güçlü kovalent bağlar yüksek dayanımı sağlar. Her katman ise birbirine van der Waals bağlarıyla bağlı olup ısıl ve elektriksel iletkenliği sağlar [21].

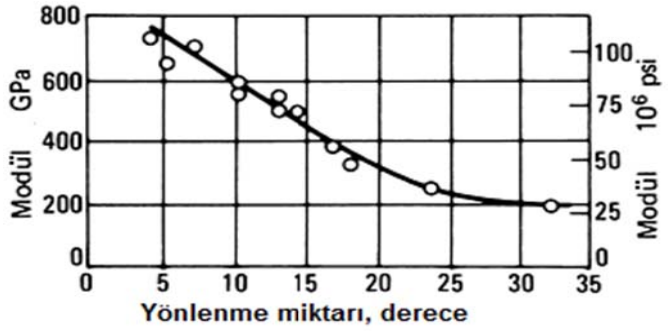
Mikroyapının yönlenmesini arttırmak filamanların çekme modülünü, elektriksel ve ısıl iletkenliğini ve yoğunluğunu arttırır. Bu ise fiberleri germe gibi plastik deformasyonla yada ısıl işlemle sağlanabilir. Şekil 4.4'te ısıl işlem sıcaklığı ile

yönlenme derecesinin, x ışınları difraksiyonu sonucu elde edilmiş bağıntısı görülmektedir. İstenilen yönlenme derecesi, kristalitler ile fiber ekseni arasındaki açının düşüklüğüyle ölçülmektedir. Açının 0 derece olması kristalitlerin fiber ekseniyle mükemmel bir şekilde hizalı olmasıdır. Isıl işlem sıcaklığının artmasıyla yönlenmenin istenilen doğrultuda arttığı şekil 4.4'te görülmektedir [24,25].



Şekil 4.4 : PAN ve arafaz zift fiberlerde ısıl işlem sıcaklığıyla yönlenme derecesinin bağıntısı [24].

Molekül yönlenmesinin istenilen şekilde olmasıyla fiberlerin modülleri artış gösterir (Şekil 4.5). Fiberlerin modülü ayrıca stabilizasyon ve karbonizasyon aşamalarında fiberlerin gerilmesiyle de sağlanır. Bu durumda termal enerjiden daha çok mekanik çekme kuvveti moleküler dizilimin yeniden düzenlenmesini sağlar [24,25].



Şekil 4.5 : Arafaz zift bazlı karbon fiberde yönlenme derecesiyle modül arasındaki ilişki [24].

Enine Yapı

Eksenel yönlenme fiberin modülünü belirlerken, fiberlerin dayanımını da enine ve eksenel yönde olan hataların sayısı ve boyutu belirler. Eksenel yapıdan farklı olarak enine yapı başlangıç malzemesinin türüne ve işlenmesine bağlı olarak değişir [26,27].

Hataların boyutu ve sayısı fiberin boyutunu düşürmesine rağmen kompozit binlerce hatta milyonlarca fiberden oluştuğu için bu hataların sonuç mamüle etkisi orta seviyededir.

4.2.1. Fiber Yapısının Özelliklere Etkisi, PAN ve Arafaz Zift Başlangıç Fiberlerinin Karşılaştırılması

PAN bazlı başlangıç fiberlerinden üretilen fiberler, arafaz zift bazlı başlangıç fiberlerinden üretilen fiberlere göre genellikle daha yüksek çekme ve basma dayanımına sahip olmakla birlikte daha düşük modüle sahiptirler. PAN bazlı fiberlerin yapısı mekanik özelliklerin dengeli olmasını ve bunun sonucunda çok daha fazla tercih edilen fiber türü olmasını sağlamıştır [21,28].

PAN fiberleri önceleri standart, orta ve yüksek modüllü olarak kategorize edilmelerine rağmen ilerleyen yıllarda fiber üreticilerinin yeni ürünleri bu kategorizasyonu belirsizleştirmeye başlamıştır. Bu üç farklı modüllü fiberler aynı başlangıç malzemesinden üretilmelerine rağmen, üretim değişkenleri olan germe kuvveti, ısıl işlem sıcaklıkları ve sürelerindeki farklılıklar sonucu farklı modüllere sahiptirler. Uzay uygulamaları için üretilen fiberlerde ise daha önce de belirtildiği gibi kullanılan başlangıç fiberi malzemesi farklıdır [21]. Tablo 4.1'de PAN bazlı karbon fiberlerin özellikleri görülmektedir.

Çizelge 4.1 : PAN bazlı karbon fiberlerin özellikleri [21].

Özellik	**Ticari, Standart Modüllü**	**Uzay Uygulamaları**		
		Standart Molüllü	**Orta Modüllü**	**Yüksek Modüllü**
Elastiklik modülü GPa	228	220-241	290-297	345-448
Çekme dayanımı, MPa	380	3450-4830	3450-6200	3450-5520
%Uzama (Kopma anında)	1,6	1,5 - 2,2	1,3 - 2,0	0,7 – 1,0
Elektriksel direnç μΩ.cm	1650	1650	1450	900
Termal iletkenlik W/m.K	20	20	20	50-80
Termal genleşme katsayısı, eksenel yönde, 10^{-6} K	-0,4	-0,4	-0,55	-0,75
Yoğunluk, g/cm^3	1,8	1,8	1,8	1,9
Karbon oranı, %	95	95	95	99+
Filaman çapı, μm	6-8	6-8	5-6	5-8
Üretici	Zoltek, Fortafil, SGL	BPAmoco, Hexcel, Mitsubishi Rayon, Toho, Toray, Tenax, Soficar, Formosa		

Kristalit boyutlarının daha büyük olması ve yönlenmenin daha iyi olması nedeniyle arafaz zift bazlı fiberlerin PAN bazlı fiberlere oranla modülleri ve termal iletkenlikleri daha yüksek, termal genleşmeleri daha düşüktür. Bu nedenle uzay uydusu uygulamalarında arafaz zift bazlı fiberler tercih edilir. Arafaz zift bazlı karbon fiberlerin özellikleri tablo 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Arafaz zift bazlı karbon fiberlerin özellikleri [21].

Özellik	**Düşük Modüllü**	**Yüksek Modüllü**	**Çok Yüksek Modüllü**
Elastiklik modülü GPa	170 - 241	380 – 620	690 – 965
Çekme dayanımı, MPa	1380 – 3100	1900 – 2750	2410
% Uzama (Kopma anında)	0,9	0,5	0,27- 0,4
Elektriksel direnç μΩ.cm	1300	900	130 - 220
Termal iletkenlik W/m.K	-	-	400 - 1100
Termal genleşme katsayısı, eksenel yönde, 10^{-6} K	-	-0,9	-1,6
Yoğunluk, g/cm^3	1,9	2,0	2,2
Karbon oranı, %	97+	99+	99+
Filaman çapı, μm	11	11	11
Üretici	BPAmoco, Mitsubishi Kasei		BPAmoco

Karbon fiber kullanılan kompozitlerin en önemli özelliklerinden birisi de mükemmel yorulma direncidir. Cam fiberleri ve aramid fiberlerinde görülen gerilme sonucu yırtılma karbon fiber kompozitlerde görülmez ve gerilim ortadan kalktığında elastik bir şekilde eski hallerini alırlar [29,30]. Bununla birlikte karbon fiberlere 2200^0C sıcaklığa kadar yorulma davranışı gözlenmez [31].

Düşük modüllü karbon fiberlerde, karbon oranının %99'un altında olması yapıda kalan azot nedeniyledir. Daha yüksek sıcaklıklarda ısıl işlem işlem yapıldığında azot yapıdan ayrılmakta, karbon yüzdesi ve fiberlerin yoğunluğu artmaktadır [21]. Tablo 4.3'de karbon fiberler ile diğer fiberlerin karşılaştırılması görülmektedir.

Çizelge 4.3 : Karbon fiber ve diğer fiberlerin karşılaştırılması [22].

Fiber türü	Elastiklik Modülü (Msi)	Çekme Dayanımı (ksi)	Yoğunluk (g/cm^3)	Fiber çapı (μ)	Maliyet ($/ton)
Karbon(PAN)	30-50	350-1000	1,75 – 1,90	4-8	20-100
Karbon(Zift)	25-110	200-450	1,90 – 2,15	8-11	40-200
Karbon(Rayon)	6	150	1,6	8-9	5-25
Cam	10-12,5	440-670	2,48-2,62	30	5-40
Aramid	20	410	1,44	-	25-75
Bor	58	730-1000	2,3-2,6	100-200	100-250

4.3. Polimerik matrisli kompozitlerde kullanılan diğer pekiştiriciler

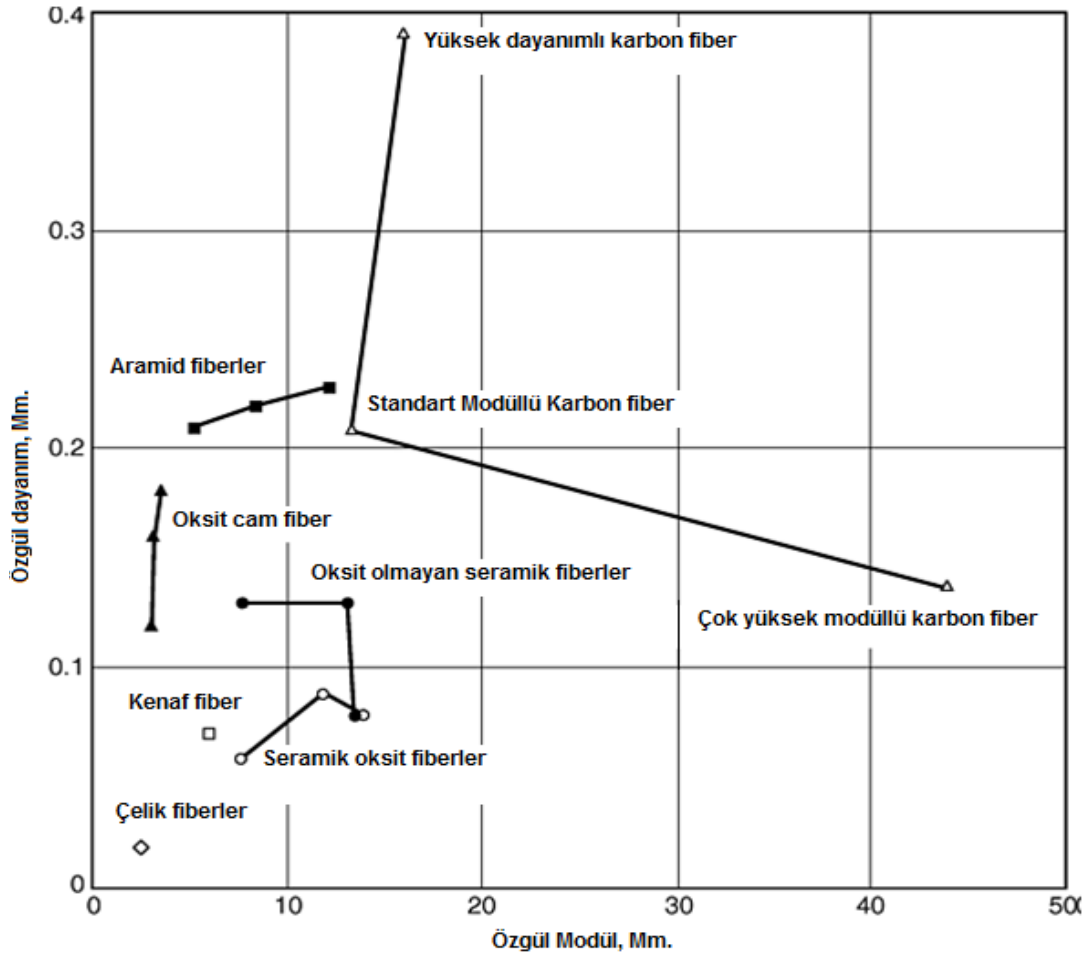
Polimetrik matrisli kompozitlerde kullanılan fiberler, doğal fiberler, oksit cam fiberler, aramid fiberler ve karbon/grafit fiberler olarak gruplandırılabilir. Gruplandırmada, kullanım alanları, dayanım ve maksimum kullanım sıcaklıkları üzerinde durulmuştur.

Doğal fiberler: Dayanıklı liflere sahip kenevir türü bitki lifleri otomobillerin iç bölümlerinde kullanılan polimerik matrisli kompozitlerde kullanılıp, türevlerine göre daha düşük maliyetlidirler . Yoğunlukları ortalama 1,5 g/cm^3 olup, 6,0 Mm. olan özgül modülü, düşük modüllü aramid fiberlerden daha yüksektir. 150^0C sıcaklıkların altında kullanılmaya uygundurlar [32].

Oksit cam fiberler : Kompozitlerde pekiştirici olarak kullanılan oksit cam fiberler, E camı, S camı ve yüksek saflıkta silika fiberler olmak üzere üçe ayrılırlar. Yüksek saflıkta silika fiberler aynı zamanda kuvars fiberler olarak da bilinirler. E camları ticari olarak boron içeren ve boron içermeyen şekilde bulunurlar. Cam fiberlerin yoğunlukları 2,15 g/cm^3 ile 2,54 g/cm^3 arasında değişmekte olup özgül modülleri E camı için 3,1Mm., S camı için 3,6Mm. arasındadır. Maksimum kullanım sıcaklıkları

E camı için 500°C, silika/kuvars camı için 1050°C olup taşımacılık ve uçaklarda kullanılan kompozitler için uygundurlar [21].

Aramid fiberler : Yoğunluğu 1.44 g/cm^3 olan aramid fiberler yüksek çekme dayanımı, düşük yoğunluk ve üstün tokluk özelliklerine sahiptirler. Yüksek tokluk özelliği aramid fiberlere balistik koruma ve darbe tolere etme özellikleri kazandırmıştır. Bu özellikleri nedeniyle kurşun geçirmez yelek (kevlar), tank ve askeri uçak zırhı malzemesi olarak kullanılırlar. Ayrıca titreşim sönümleme kabiliyeti de yüksek olan polimer matrisli aramid kompozitler -36 ile 200^{0}C sıcaklıklar arasında kullanılabilirler [22]. Şekil 4.6'da çeşitli fiberlerin özgül modül ve özgül dayanım özellikleri verilmiştir.



Şekil 4.6 : Polimerik kompozitlerde kullanılan pekiştirici fiberlerin özgül dayanımları ve özgül modülleri [21].

Polimerik matrisli kompozitlerde kullanılan pekiştirici fiberlerin dayanımları yeterli seviyede olup nihai kompozit malzemenin dayanımının istenilen seviyede olmasını sağlarlar. Bu malzemelerin uygulama alanlarında kullanılabilir olup olmadıklarını

belirleyen en önemli ölçütler çekme dayanımı ve elastiklik modülüdür. Bununla birlikte uzay uygulamaları, hava taşımacılığı ve ulaşım gibi alanlarda kompozitlerin kullanılabilirliği için yoğunluk da çok önemli bir parametredir. Bu yüzden bu alanlarda kullanılacak malzemelerin mekanik özellikleri karşılaştırılırken yoğunluk da göz önünde bulundurularak özgül dayanım ve özgül modül özellikleri dikkate alınır. Özgül özellikler malzemenin dayanım gibi bir özelliğinin yoğunluğuna bölünmesiyle elde edilir ve genellikle uzunluk birimleriyle (10^6 metre = Mm) gösterilirler [21].

4.4. Karbon Fenolik Aşınır Kompozitler

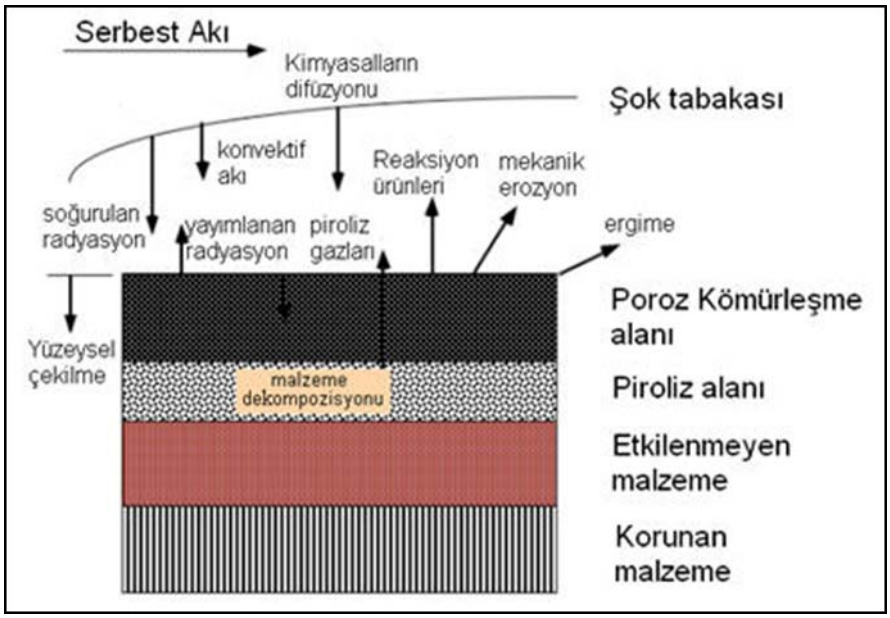
Aşınır (ablatif) kompozitler, polimerik bir reçinenin içerisine gömülmüş sürekli veya süreksiz pekiştiricilerden meydana gelirler. Atmosfere giren sistemler, yüzeylerine yüksek bir hızla çarpan parçacıklardan kaynaklanan bir ısı akısıyla karşılaşırlar. Yüksek sıcaklıklarda reçine, pirolize uğrar ve kütle kaybıyla oluşan piroliz gazı ısı akısını bloke ederek büyük miktarda ısının yüzeyden uzaklaşmasını sağlar [11].

Ticari üretimi en fazla yapılan fenolik reçine, fenol ve formaldehitten hazırlanandır. Fenolik reçineler, diğer termosetler gibi kırılgandır. Fiberlerle yapılan takviye, polimerin gevrekliğini azaltırken diğer bazı mekanik özelliklerini geliştirir. Ayrıca takviye elemanı olarak katılan fiberlerin, kimyasal yapıları gereği ısı ve aleve karşı dayanıklı olan polimerin ısıya dayanımını daha da arttırır. Bu nedenle fenolik kompozitler daha çok alev ve ısıya dayanımının arandığı yerlerde kullanılır [11].

Bunlar arasında fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler hafif olmaları ve birim kütleleri başına yüksek yük taşıma kapasiteleri nedeniyle tercih edilirler. Bu kompozitler takviyesiz malzemelerle kıyaslandığında elastik modülü, aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklara dayanma gibi mekanik özelliklerde önemli ölçüde üstünlüğe sahiptirler [11].

Aşınır kompozitler organik reçinelerin bağlayıcı olarak kullanıldığı kompozitlerdir. Üretim ve uygulama kolaylığı, düşük maliyet, tamamen aşınana kadar etkili kullanılabilmeleri ve kullanımdan sonra değiştirilebilmeleri kullanım avantajları olarak sıralanabilir. Aşınır kompozitler yüzeye çarpan sıcak gaz tabakasını sistemin dış duvarından, ortamdan daha soğuk bir ara yüzey oluşturarak uzaklaştırır. Aşınma kütle ve ısı transferi işlemidir ve sisteminin katmanlarında kömürleşme, ergime ve

süblimleşmeye neden olur. Bu olay piroliz olarak adlandırılır. Tüm bu reaksiyonlar endotermik reaksiyonlardır (buharlaşma, süblimleşme gibi) ve çevreden ısı alarak daha soğuk ara katmanların oluşmasına neden olurlar. Piroliz ile oluşan gazlar konvektif ve katalitik ısı akısını durdururlar. Büyük miktarda ısı enerjisi yüzeysel ve hacimsel aşınma olmak üzere iki temel işlemle uzaklaştırılır. Yüzeysel aşınma deformasyona neden olmaz. Aşınma esnasında özkütle sabit kalırken hacim azalır. Buharlaşma, süblimleşme, termokimyasal reaksiyonlar, termomekanik erozyon yüzey aşınması sırasında oluşan reaksiyonlardır. Hacimsel aşınmada ise hacim korunurken özkütle kaybı termo-dekompozisyon (piroliz) ve termo-oksidatif dekompozisyon reaksiyonlarıyla meydana gelmektedir. Hacimsel aşınma sırasında faz geçişleri ve kompozit içerisinde kimyasal reaksiyonlar meydana gelir. Reçine pirolize uğrar ve genellikle hidrokarbonlardan oluşan gaz fazından ürünler meydana gelir. Piroliz gazı yüzeyden süzülerek şok tabakasıyla karşılaşır. Reçinenin pirolizi tahkimatın üzerinde biriken karbonlu kalıntılar meydana getirir ve yüzey kömürleşir. Piroliz gazının şok tabakasına girişiyle bu tabakanın özellikleri konvektif ısınmayı azaltıcı yönde değişir. Özet olarak kütle kaybıyla oluşan piroliz gazı ısı akısını bloke eder ve büyük miktarda ısının yüzeyden uzaklaşmasını sağlar. Aşınan kompozit malzemede meydana gelen reaksiyonlar ve tabakalar Şekil 4.7'de verilmektedir. Şok tabakasının türleriyle yüzey arasındaki kimyasal reaksiyonlar yüzey malzemesinin tüketilmesine neden olabilir ve yüzeyin net enerjisi üzerinde etkilidir [11].



Şekil 4.7 : Aşınır kompozitte meydana gelen reaksiyonların şematik gösterimi.[11]

5. ISI KALKANLARI

Yakın geçmişte uzak yolculuğuna ve uzay keşiflerine olan ilginin artması nedeniyle, atmosfere giriş yapan araçlarda kullanılan ısı kalkanları oldukça önem kazanmıştır. Bu araçlar başta insan olmak üzere önemli bilimsel ekipmanlar ve iletişim cihazları taşıdıkları için atmosfere giriş anında oluşan yüksek sıcaklıklardan korunmaları gerekmektedir. Bu konuda çok sayıda araştırmalar yapılmış ve yeni çözümler üretilmeye çalışılmıştır. İlk olarak yüksek sıcaklıklara mükemmel direnç gösteren seramik malzemeler önerilmiştir. Çeşitli seramik malzemelerden üretilmiş kalkanlar denense de, bu seramik kalkanlarla uzay aracını oluşturan asıl malzemeler arasındaki termal genleşme miktarlarındaki farklılıklardan dolayı kullanımları olanaksız olmuştur. Malzemeler arasındaki bu termal genleşme farklılıkları seramik kalkanlarda çatlaklara sebep olmuş ve bu çatlaklar kalkanın koruma görevini yerine getirememesine neden olmuştur. Görülen bu çatlama oluşumları üzerine yeni malzemeler geliştirilmiştir [33].

Uzay araçlarında kullanılan termal koruma sistemleri genel olarak 2 sınıfa ayrılır:

- Yeniden kullanılabilir termal koruma sistemleri
- Ablatif termal koruma sistemleri

5.1. Yeniden Kullanılabilir Isı Kalkanları

Bu tip koruma sistemlerinde, atmosfere giriş esnasında ısı kalkanının kütlesinde ve özelliklerinde herhangi bir değişiklik meydana gelmez. Genellikle bu tip ısı kalkanları düşük ısı geçişlerinin gerçekleştiği atmosfer ortamlarına dayanıklı oldukları için kullanım alanları oldukça sınırlıdır. Yeniden kullanılabilir termal koruma sistemlerinin en önemli avantajı ışınımsal salım gücünün çok yüksek olması (geri ışınımın gerçekleşmesi) ve ısı kalkanı yüzeyinde herhangi bir reaksiyonun gerçekleşme olasılığının çok düşük olmasıdır. Ayrıca inorganik yapıya sahip olan birincil izolasyon tabakası düşük termal iletkenliğe sahip olması birincil tabakayı

oluşturmak için gerekli olan izolasyon malzemesi miktarında azalmaya sebep olmaktadır [34].

5.2. Ablatif Isı Kalkanları

Yüksek ısı akılarına karşı yüksek direnç ve mukavemet göstererek, atmosfere giriş esnasında yapısında faz ve kütle değişimi gerçekleşen sistemlere ablatif ısı kalkanları adı verilmektedir. Ablatif ısı kalkanlarının temel fonksiyonu yüksek darbe etkisine sahip sıcak hava tabakasının, ısı kalkanın dış yüzeyi tarafından soğuk bir sınır tabakası oluşturularak yüzeyden püskürtülmesidir. Ablatif ısı kalkanları sürtünmeye bağlı oluşan ısıl şokların endotermik piroliz reaksiyonları ile azaltılmasından faydalanır. Termal bozunma sırasında kompozitin dış yüzeyinden gaz çıkışı meydana gelir ve matris malzemesinde ağırlık kaybı gerçekleşir. Isı kalkanın dış yüzeyine etki eden sıcak hava tabakasının etkisinin azaltılmasına neden olan bu prosese genel olarak tutma prosesi adı verilir. Sürtünme esnasındaki yüksek ısı akısı piroliz reaksiyonlarının oluşmasını tetikleyerek, Termal Koruma Sistemindeki (TPS) tabakaların üstünde kömürleşme, ergime ve süblimleşme sonucu aşınmalara neden olmaktadır. Ayrıca bu reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan gazlar, yukarıda da bahsedildiği üzere konvektif ve katalitik sıcak hava akısını, ısı kalkanının üzerinden püskürterek tutma prosesinin gerçekleşmesini sağlamaktadır.

Bozunma reaksiyonları gerçek zamanlı olarak termogravimetrik analiz(TGA) ile ölçülebilir ve kompozit malzemenin ablatif performansı değerlendirilebilir. Karbon-fenolikler ilk defa füze nozülleri için kullanılmak üzere geliştirilmişlerdir. Galileo sondasında birincil ısıl koruma mekanizması olarak ışınımsal ısı akışının engellenmesinden faydalanan karbon-fenolik ısı kalkanı sistemi kullanılmıştır. Ablatif termal koruma sistemleri 40 yıldan beri birçok uygulamada kullanılmaktadır . Belli başlı ablatif termal koruma sistemleri: [34]

- SLA-561V
- Avcoat-5026H/C
- SIRCA
- PICA

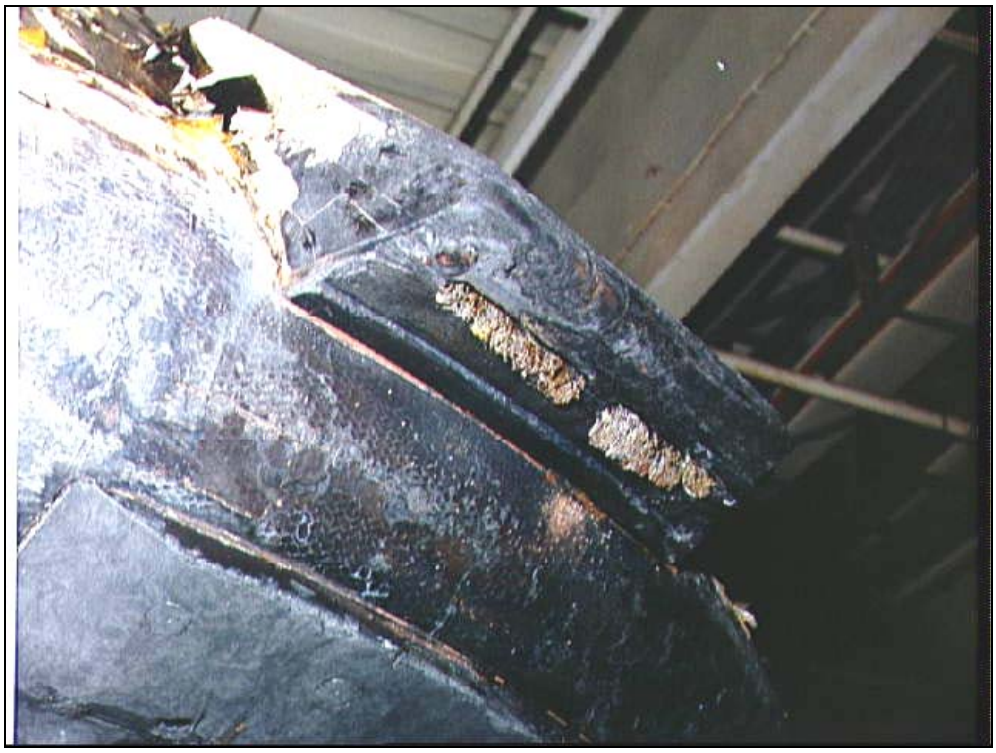
5.2.1. SLA 561V

Martin Lockheed tarafından tescil ettirilen SLA-561V, yapısında geleneksel karbon fenolik kompoziti bulunan süper hafif ablatif ısı kalkanı anlamına gelmektedir. SLA-561V, NASA tarafından Marsa gönderilen 70 derece küresel-konik uzay araçlarının tümünde kullanılmaktadır. [34]

Yapılan testlerde SLA-561V'in ablatif özelliklerinin 75 W/cm²'lik ısı akısı altında belirgin olarak ortaya çıktığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca 300 W/cm²'lik ısı akısı altında SLA-561V ısı kalkanının uzay kapsülünü koruyamadığı ve parçalara ayrıldığı sonucuna varılmıştır. Amerika'daki Mars Bilim Laboratuarı'nda 234 W/cm²'lik ısı akısına dayanabilen SLA-561V ısı kalkanı dizayn edilmiştir. Isı kalkanı bal peteği şeklinde hazırlanmış iskeletin boşluklarına uygulanarak uzay kapsülüne kolayca monte edilmektedir. [34]

5.2.2. AVCOAT – 5026H/C

AVCOAT-5026 H/C ısı kalkanı Apollo komut modülünü kapsayan düşük yoğunluklu cam dolgulu epoksi/novalak sisteminden oluşmuş bir termal koruma sistemidir. Apollo'nun birçok uçuşunda kullanılan Avcoat-5026 H/C ablatif malzemesi, yüksek ısıl dayanım göstererek uzun yıllar önemli bir yere sahip olmayı haketmiştir. Ancak değişken basınçlı ortamlarda aşınma hızının çok yüksek değerlere ulaşması, bu malzemenin üzerinde soru işaretlerinin oluşmasına neden olarak yeni ablatif malzemelerin tasarımına öncülük etmiştir. Değişik basınç ve ortamlarda yapılan testlerde Avcoat–5026 H/C'nin ablatif özelliklerinin, ısı transfer katsayısının derecesine doğrudan bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Isı transfer katsayısının arttığı ortamlarda malzeme yüzeyinde mekanik hatalara rastlanmıştır [34] Şekil 5.1'de Apollo mekiğinin komut kodülünde kullanılan ısı kalkanının karbonize olmuş hali görülmektedir.



Şekil 5.1 : Apollo mekiği komut modülünde kullanılan ısı kalkanımım karbonize olmuş durumda görünümü [35].

5.2.3. SIRCA

SIRCA, silikon ile emprenyelenmiş seramik aşındırıcı ısı kalkanına verilen genel isimdir. NASA Ames Araştırma Laboratuvarı'nda geliştirilerek Pathfinder gibi uzay kapsüllerinin arka kabuklarının ara yüzeylerinde kullanılmaktadır. SIRCA, Deep Space 2 uzay kapsülünde termal koruyucu malzeme olarak kullanılmış, fakat yüksek ısı akısı altında beklenen özellikleri gösteremediği için tek başına ısı kalkanı olarak kullanımı gerçekleşmemiştir. SIRCA'nın en önemli özelliklerinden biri diğer ısı kalkanı malzemelerine göre kolayca şekil verilmesi ve istenilen bölgeye kolayca takılmasıdır. Üretildikten sonra ekstra bir prosese, ısıl işleme ve kaplamaya gereksinim duyulmaz. Böylece SIRCA tuğla halinde, motor çıkışlarında veya burun kısımlarında arka malzeme olarak sıkça kullanılır [34].

5.2.4 PICA

Hafif Seramik Aşındırıcılar (LCA) grubunun bir üyesi olan PICA, fenolik reçine ile emprenyelenmiş karbon aşındırıcılı ısı kalkanı anlamına gelmektedir. NASA'nın Ames Araştırma Laboratuarı'nda geliştirilen PICA, gerek yüksek ısınma hızlarına dayanımıyla, gerek ısı akısının oluşturduğu kayma kuvvetlerine (12OO W/cm²) karşı yüksek direnç göstermesiyle geleneksel ablatif ısı kalkanlarının yerini almaya

başlamıştır. Ayrıca sahip olduğu düşük yoğunluk sayesinde uzay aracının ağırlığını düşürerek, araca daha çok bilimsel yükün yüklenmesi ve yakıt tasarrufu sağlanmıştır.

Genel olarak PICA, düşük yoğunluklu karbon fiber alt tabakaya, fenolik reçinenin süzdürülmesi sonucu üretilir. PICA'nın üretiminde süzdürülen SC1008 fenolik reçinesi, fenol ve formaldehitin uygun katalizör vasıtasıyla gerçekleşen kondenizasyon reaksiyonları sonucu oluşmaktadır [34] Şekil 5.2'de Dragon mekiğinin PICA ısı kalkanları yerleştirilme aşamasında görülmektedir.



Şekil 5.2 : Dragon mekiği PICA ısı kalkanlarının yerleştirilmesi [36].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Amaç

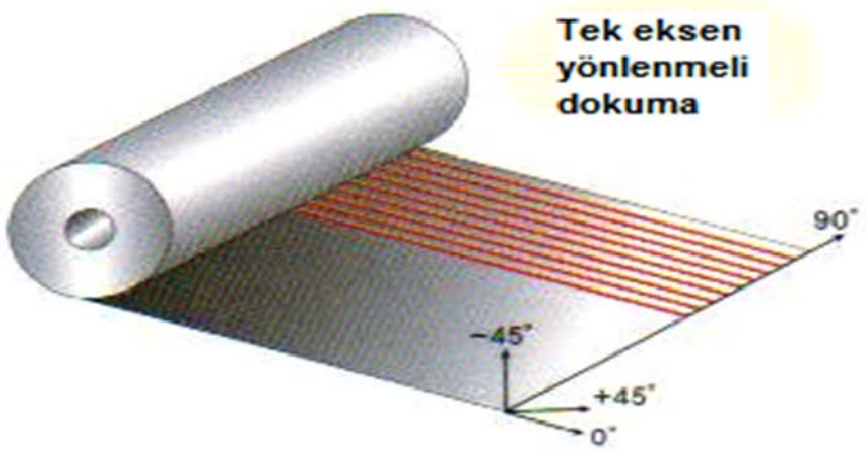
Tabakalanmış kompozitlerin mekanik ve ısıl özellikleri, asıl olarak, yapıyı oluşturan pekiştirici ve matris bileşenlerinin özelliklerine, bunların hacim oranlarına, pekiştirici bileşenin yapıdaki yönlenmesine ve tabakalar arası bağ mukavemetine bağlıdır.

Matris ve pekiştiricinin hacim oranları, kompozitten beklenilen özelliklere ve bu bileşenlerin kendi özellikleri göz önünde tutularak seçilir. Pekiştiricinin yönlenmesi, farklı fiber yönlenmesine sahip dokumalar kullanılarak kontrol edilir. Bileşik tabakaların mukavemeti, tabakalar arasındaki bağ mukavemetine bağlıdır. Bu bağ mukavemeti çekme veya basma şeklinde uygulanacak yükler altında tabakaların birbirinden ayrılmamalarını sağlayacak düzeyde olmalıdır.

Bu çalışmanın amacı, karbon – fenolik esaslı, kalıplanabilir polimerik matrisli kompozit ısı kalkanı üretimi ve karakterizasyonudur. Bu amaca yönelik olarak yapılan çalışmalarda pekiştirici yönlenmesi ve reçine içeriğinin kompozitin çekme ve basma mukavemetleri ile ısıl özelliklerine olan etkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

6.2. Kompozit örneklerinin üretiminde kullanılan malzemeler ve cihazlar

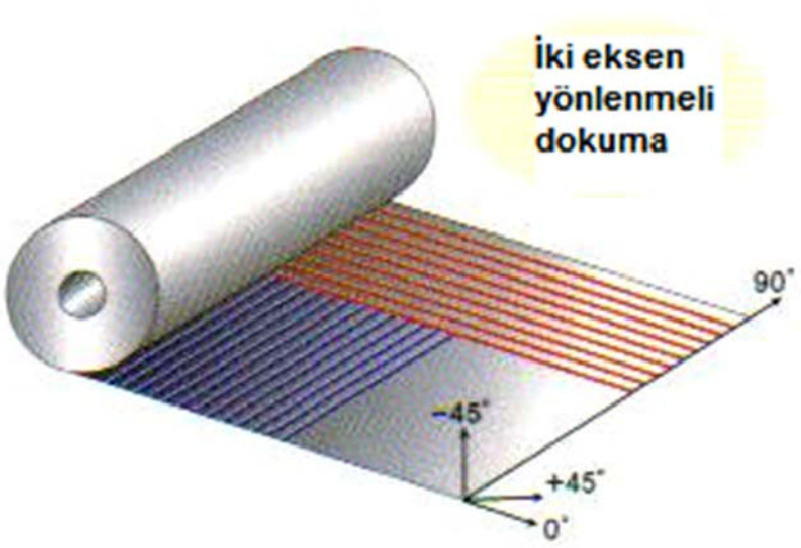
Polimerik matrisli kompozitilerin üretiminde takviye elemanı olarak 0° ve 0°/+45°/-45° fiber yönlenmelerine sahip karbon dokumalar kullanılmıştır (Kore menşeili, YC12K 200 g/m^2). Deneysel çalışmalarda bu iki tip dokumanı yanı sıra üretilen 0°/90° yönlenmeli kompozitler ise, 0° yönlenmeye sahip dokumanın yatay ve dikey konumlarda üst üste konulmasıyla elde edilmiştir. Tek tabakalardaki yönlenmeler yatay eksene göre olup şekillerde (6.1, 6.2 ve 6.4) gösterilmiştir. Kullanılan dokumalar ise şekil 6.3 ve 6.5'de gösterilmiştir.



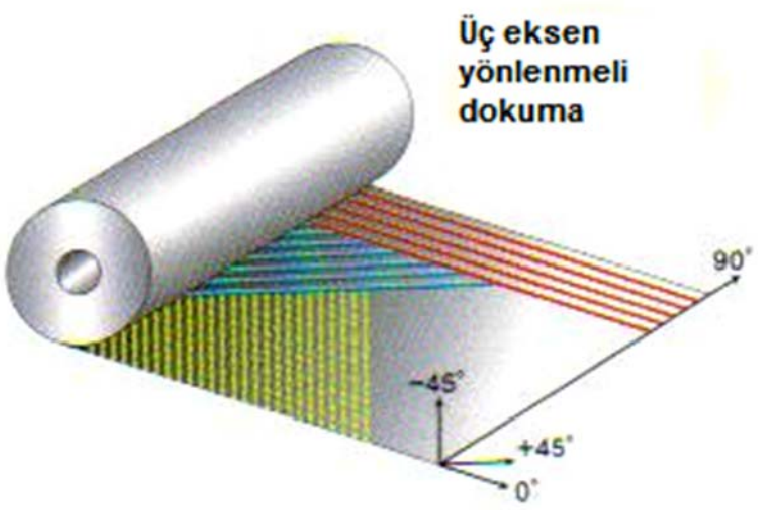
Şekil 6.1 : 0° yönlenmeli karbon dokumanın şematik gösterimi.



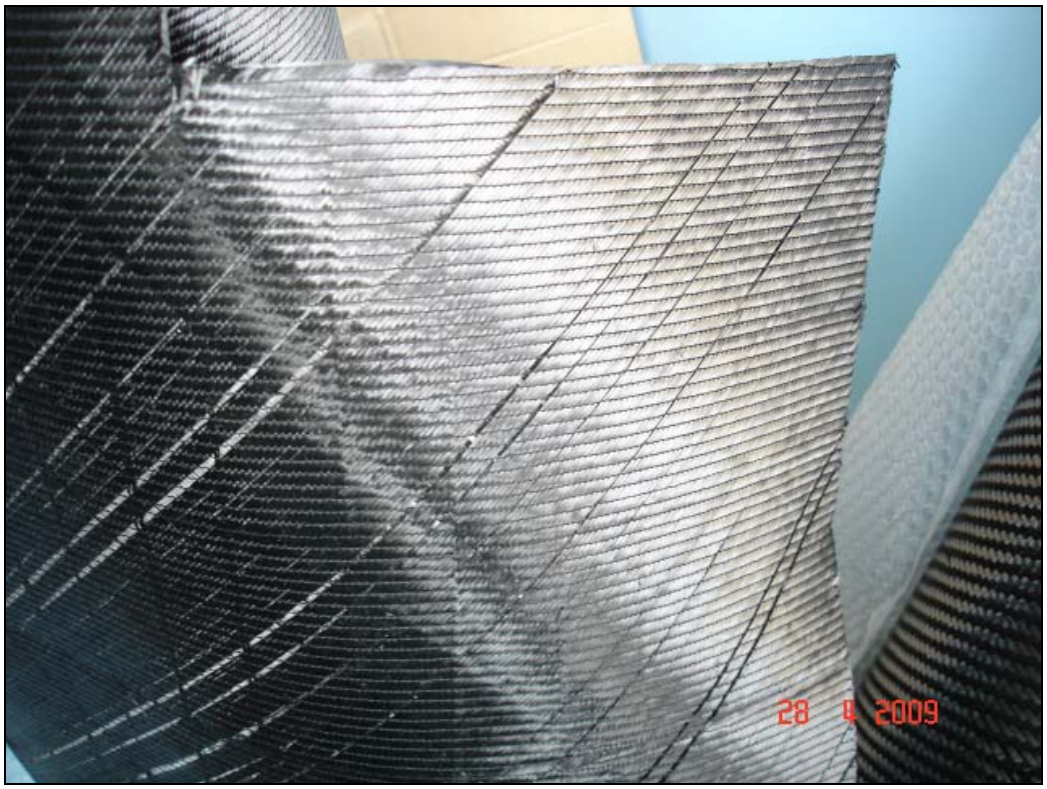
Şekil 6.2 : 0° yönlenmeli karbon dokumanın görünümü.



Şekil 6.3 : 0°/90° yönlenmenin şematik görünümü.



Şekil 6.4 : 0°/+45°/-45° yönlenmeli karbon dokumanın şematik görünümü.



Şekil 6.5 : 0°/+45°/-45° yönlenmeli karbon dokumanın görünümü.

Matris malzemesi olarak ise Hexion Specialty Chemicals firmasından temin edilen SC1008 fenolik reçine kullanılmıştır. Kullanılan fenolik reçine %25-35 izopropanol, %12,5- 15,0 fenol, %0,2- 1,0 formaldehit bileşiminde olup fiziksel ve kimyasal özellikleri tablo 6.1'de belirtilmiştir.

Çizelge 6.1 : SC1008 fenolik reçinenin fiziksel ve kimyasal özellikleri

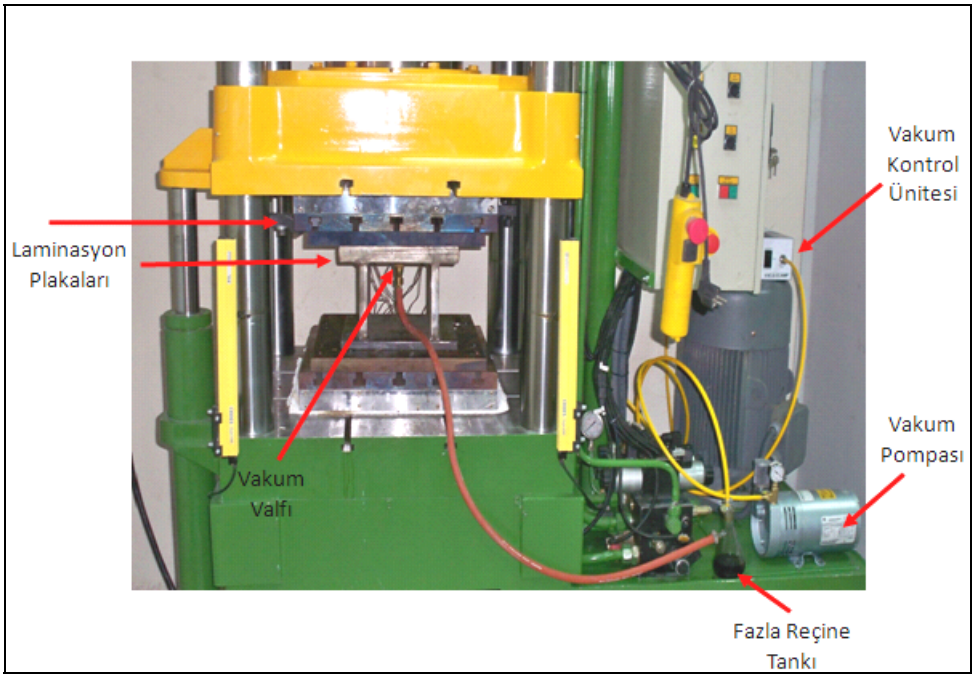
Görünüm ve form	Koyu kırmızı-kahverengi, sıvı
Kaynama noktası	83°C
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı	450°C
Oksitleme özelliği	Oksitleyici değil
Ph	8,2
Relativ yoğunluk	1,1
Suda çözünürlük	Kısmen

Kompozitlerin üretiminde saf reçine ile birlikte %50 ve %75 reçine içeren çözeltiler de kullanılmıştır. Bu çözeltiler Merck kalitesinde (%99,9 saflık) etilen glikol kullanılarak hazırlanmıştır.

Kompozit malzemelerin kalıplanması işlemlerinde yüksek sıcaklığa dayanıklı vakum torbası, fazla reçinenin emilmesini sağlayan cam keçe ve bleederdan yararlanılmıştır. Reçinenin pekiştirici dokumalara emdirilmesinde fırça ve el merdaneleri kullanılmıştır.

Reçine emdirilmiş ve üst üste konulmuş tabakalarda reçinenin jelleştirilmesi işlemi kontrollü ısıtmanın uygulanabildiği ısıl işlem fırınında (Nabertherm) gerçekleştirilmiştir.

Sıcak laminasyon işleminde 250 ton kapasiteli hidrolik pres kullanılmıştır. Üretimi planlanan kompozit levhaların hazırlanmasında 300°C'ye kadar kontrollü olarak ısıtmanın sağlanabildiği kalıp kullanılmıştır. Jelleştirme ve kürleme ısıl işlem süreçlerinde açığa çıkan çözücü ve su buharının sistemden uzaklaştırılması için -0,7 bar negatif basınç sağlayan vakum pompası kullanılmıştır. Kompozitin yer aldığı vakum torbasına yerleştirilen vakum valfi tasarımı yapılan kalıp ile irtibatlandırılarak torbadan çekilen fazla reçinenin toplandığı cam behere bağlanmıştır (Şekil 6.6).



Şekil 6.6 : Laminasyon presi ve vakum ünitesi

Üretilen kompozit levhalardan mekaniksel ve ısıl test örneklerinin hazırlanmasında elmas kesici diskin kullanıldığı kesme cihazından (bosch) yararlanılmıştır.



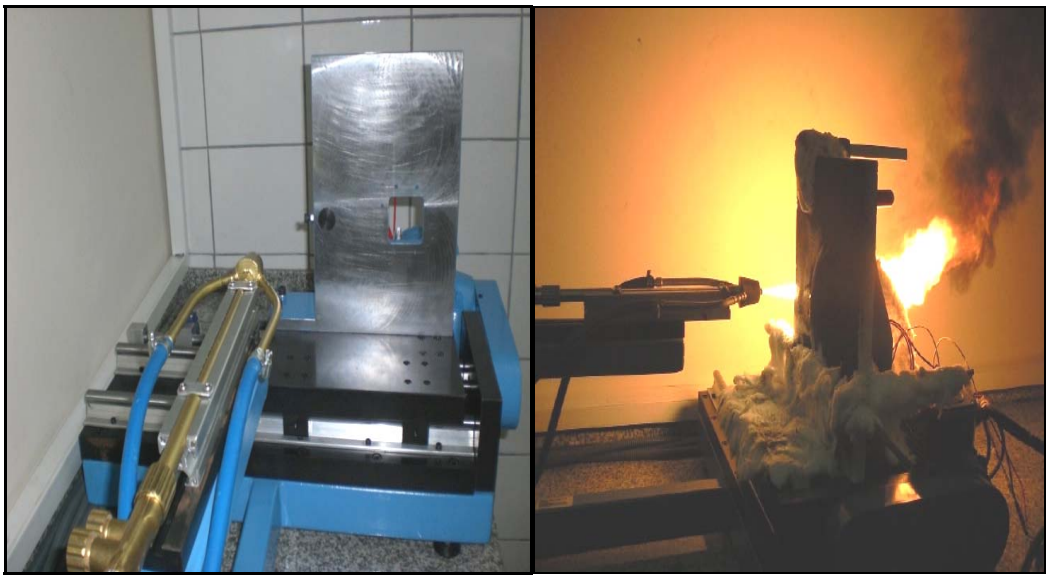
Şekil 6.7 : Jelleşme işlemi için kullanılan ısıl işlem fırını(solda) ve kesme cihazı.

6.3. Kompozit Örneklerinin Karakterizasyonu ve Karakterizasyonda Kullanılan Cihazlar

Üretilen kompozitlerin çekme ve basma testleri Instron cihazında gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri ASTM-D630, basma testleri ise ASTM-D695 standartlarına göre yapılmıştır. Bu testlerde 1mm/dakikalık yükleme hızı kullanılmıştır. Çekme ve basma mukavemet değerleri üç ila beş arasında değişen test sonuçlarının ortalama değeri olarak alınmıştır.

Isı kalkanı uygulamaları için kullanılacak malzemelerde ısıl karakterizasyon kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle üretilen kompozit örneklerine dinamik ısı akısı, statik ısı akısı ve ısıl iletkenlik testleri uygulanmıştır.

Dinamik ısı akısı testi şekil 6.8'deki test düzeneği kullanılarak ASTM-E285-80 standardına göre ve 10x10 cm.'lik kuponlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde düzeneğe yerleştirilen örnekler 20 saniyelik süre boyunca 6.62 m^3/saat debili oksiasetilen aleviyle sağlanan ısı akısına maruz bırakılmıştır. Kuponların yüzeyine ulaşan ısı akısı yaklaşık 7.500 kW/m^2 olarak ölçülmüştür. Test sonrası kuponlardaki ağırlık kaybı ölçülmüştür. Dinamik ısı akısı test sonuçları 3 ayrı test örneğinden elde edilen sonuçların ortalaması olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 6.8 : Dinamik ısı akısı test düzeneği.

Statik ısı akısı testinde, 55x55 mm boyutlarında hazırlanan örnek kuponlar, 20 saniye boyunca 450 kW/m^2 kızılötesi ısı akısına maruz bırakılmış ve kupon arkası sıcaklık termokupl kullanılarak belirlenmiştir. Test sonuçları 3 ayrı test örneğinden elde edilen sonuçların ortalaması olarak değerlendirilmiştir. Statik ısı akısı testi ile ölçülen kupon arkası sıcaklıklar ısı kalkanının kullanıldığı sistemin ve sistemdeki cihazların veya insanlı uzay araçları gibi uygulamalarda insanların maruz kalacağı sıcaklığı belirlemesi açısından önem taşımaktadır.

Kompozitlerin ısıl iletkenliği ASTM E1461 standardına uygun olarak lazer flaş sistemi kullanılarak oda sıcaklığında belirlenmiştir. Bu testte prensip, numunenin bir yüzeyine kısa süreli uygulanan lazer demetinin diğer yüzeyde meydana getirdiği sıcaklık değişiminin tespit edilmesidir. Testler, 15,8 mm. çapında ve 2mm. kalınlığında kompozit örnekleri üzerinde yapılmıştır.

Üretilen kompozitlerin yoğunluk ölçümleri, ikinci üretim koşullarına göre üretilen (fırında jelleştirme ile) numuneler üstünde, Arşimet yöntemi kullanılarak ölçülmüştür.

6.4. Kompozit Malzemelerin Üretimi

Kompozit malzemelerin üretiminde yöntem seçimi, ürünlere uygulanması planlanan test ve karakterizasyon yöntemleri göz önünde tutularak yapılmıştır. Bölüm 6.3'de

tanımlanan bu testler plaka şekilli örneklerden kesilerek hazırlandığından, üretim yönteminin de bu tür plakaların hazırlanmasına uygun olması gerektiği açıktır. Pekiştirici dokumaların kullanıldığı plaka şekilli kompozit malzemeler için uygun olabilecek üretim tekniği ise sıcak laminasyondur. Bu nedenle üretilen ve karakterize edilen örneklerde sıcak laminasyon tekniği tercih edilmiştir.

Sıcak laminasyon tekniğinde prensip, reçine emdirilmiş tabakaların üst üste konularak reçinenin kürleşme sıcaklığında basınç altında tutularak mukavemetlendirilmesidir. Kompozit özelliklerini etkileyen proses parametreleri basınç, sıcaklık ve süredir. Bu esas parametrelerin yanı sıra, termoset reçinenin sertleşmesi sırasında yan ürün olarak ortaya çıkan su buharı ve çözücü buharlarının sistemden uzaklaştırılması gerekir. Deneysel çalışmalar bu temel prensipler göz önünde tutularak planlanmıştır.

Amaç bölümünde belirtildiği gibi deneysel çalışmalarda kompozitteki reçine içeriği ve dokumalardaki fiber yönlenmesinin malzeme özelliklerine olan etkilerinin belirlenmesi hedeflendiğinden kompozitlerin üretiminde kullanılan reçine konsantrasyonu %50, %75 ve %100 olacak şekilde değiştirilirken kompozitteki fiber yönlenmesi de 0°, 0°/90°, 0°/+45°/-45° şeklinde değiştirilmiştir. Üretilen kompozitlerdeki tabakaların dağılımı simetrik yapılı bir kompozit oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Kompoziti oluşturan tek tabakaların sayısı 7 ila 15 arasında değişmektedir. Bu değişim iki nedenden kaynaklanmıştır. Nedenlerden birisi mekaniksel ve ısıl testlerin uygulanacağı örneklerin farklı kalınlıkları gerektirmesidir. İkinci neden ise 0° ve 0°/+45°/-45° dokumalarının kalınlıkları arasındaki farktan kaynaklanmaktadır.

Kompozit örneklerinin hazırlanması aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır;

- Pekiştirici karbon dokumaların 16x25 cm. boyutlarında kesilmesi ve tartılması.
- Kesilen tabakalara fırça ve el merdanesi kullanarak reçinenin emdirilmesi.
- Reçine emdirilmiş tabakaların üst üste konularak sıcak laminasyona hazır hale getirilmesi.
- Sıcak laminasyon işleminin uygulanması.
- Lamine edilmiş malzemenin basınç altında ve ≈2°C/dakika hızla oda sıcaklığına soğutulması.

Kompozit malzemede sertlik ve mukavemet artışını sağlayan kürleme ısıl işlemi esas olarak iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada çözücü buharlaşması meydana gelmekte ve reçine viskozitesinin artması sonucu jelleşme gerçekleşmektedir. Bunu izleyen aşamada ise polimer zincirlerinde karşılıklı (çapraz) bağlanma meydana gelmektedir. Deneysel çalışmalarda jelleştirme ve kürleme işlemleri iki farklı şekilde yapılmıştır. Bu farklılık önceden tasarlanan bir farklılık olmayıp ilk grup deneylerden elde edilen sonuçlara göre uygulanmıştır. İlk grup deneylerde reçine emdirilmiş tabakalar vakum torbası içinde laminasyon presindeki kalıba yerleştirildikten sonra ısıtmanın başlangıcından itibaren -0,7 barlık negatif vakum basıncı uygulanmış uygulanmış ve 145°C'de 2 saat süreyle jelleşmesi sağlanmıştır. Bu aşamada 5 barlık düşük bir pres basıncı uygulanmıştır. Jelleşme aşamasından sonra sıcaklık 165°C'ye çıkarılırken pres basıncı 50 bara yükseltilmiş ve 8 saat süreyle kürleşmenin tamamlanması sağlanmıştır. İkinci grup deneylerde ise , reçine emdirilmiş tabakalar vakum ve basınç uygulaması yapılmadan ısıl işlem fırınında 3 - 3,5 saat süreyle 125^0C'de tutularak reçinenin jelleşmesi sağlandıktan sonra, -0,7 barlık negatif vakum basıncı altında, 145^0C'de tutulan laminasyon presine transfer edilmiş ve bu sıcaklıkta 15 dakika süre ile 50 barlık bir basınç uygulanmıştır. Bu sürenin sonunda sıcaklık 165^0C'ye basınç ise 125 bara yükseltilerek 8 saat tutulmuştur. Deneysel çalışmaların başlangıcında uygulanan birinci yöntem yerine bu ikinci yöntemin kullanılmasının nedeni, birinci yöntemde jelleştirme aşamasında ısıtmanın başlangıcından itibaren uygulanan vakum ve pres basıncının etkisiyle kompozitteki reçinenin büyük oranda yapıdan çıkarılarak uzaklaştırılması ve böylece kompozitteki reçine içeriğinin düşük düzeylerde kalmasıdır. Deneysel sonuçlar bölümünde değinileceği gibi, bu yöntemle üretilen kompozitlerin reçine içeriklerinin ve mekaniksel özelliklerinin düşük olduğu belirlenmiştir. Hacmen %50 oranında çözücü içeren reçine çözeltisinin kullanılması durumunda viskozitede daha ileri derecede meydana gelen düşme sonucu yapıdan uzaklaştırılan reçine miktarı artmakta ve bunun sonucu kompozitteki reçine oranı %8-11'e kadar düşmektedir. Çözücü içermeyen %100'lük reçinenin kullanılması durumunda ise kompozit yapısında kürleme sonucu kalan reçine miktarı ancak %15-18 arasında kalmaktadır.

Birinci ve ikinci yöntemin kullanıldığı proses akış şemaları şekil 6.11 ve 6.12' de gösterilmiştir.

Kompozit örnekleri hazırlanırken reçine emdirilmiş tabakalar üst üste konulduktan sonra fazla reçine, çözücü ve su buharının geçmesini sağlayan iki bleeder tabakası arasına yerleştirilmiştir. Bleeder tabakalarının alt ve üst yüzeylerine cam keçe tabakası konularak bleederdan geçen reçinenin emilmesi sağlanmıştır. Cam keçe üstüne vakum valf bağlantısı yerleştirildikten sonra sistem yüksek sıcaklığa dayanıklı torbalar içerisine yerleştirilmiş ve sıcak laminasyon işlemine hazır hale getirilmiştir (Şekil 6.9).

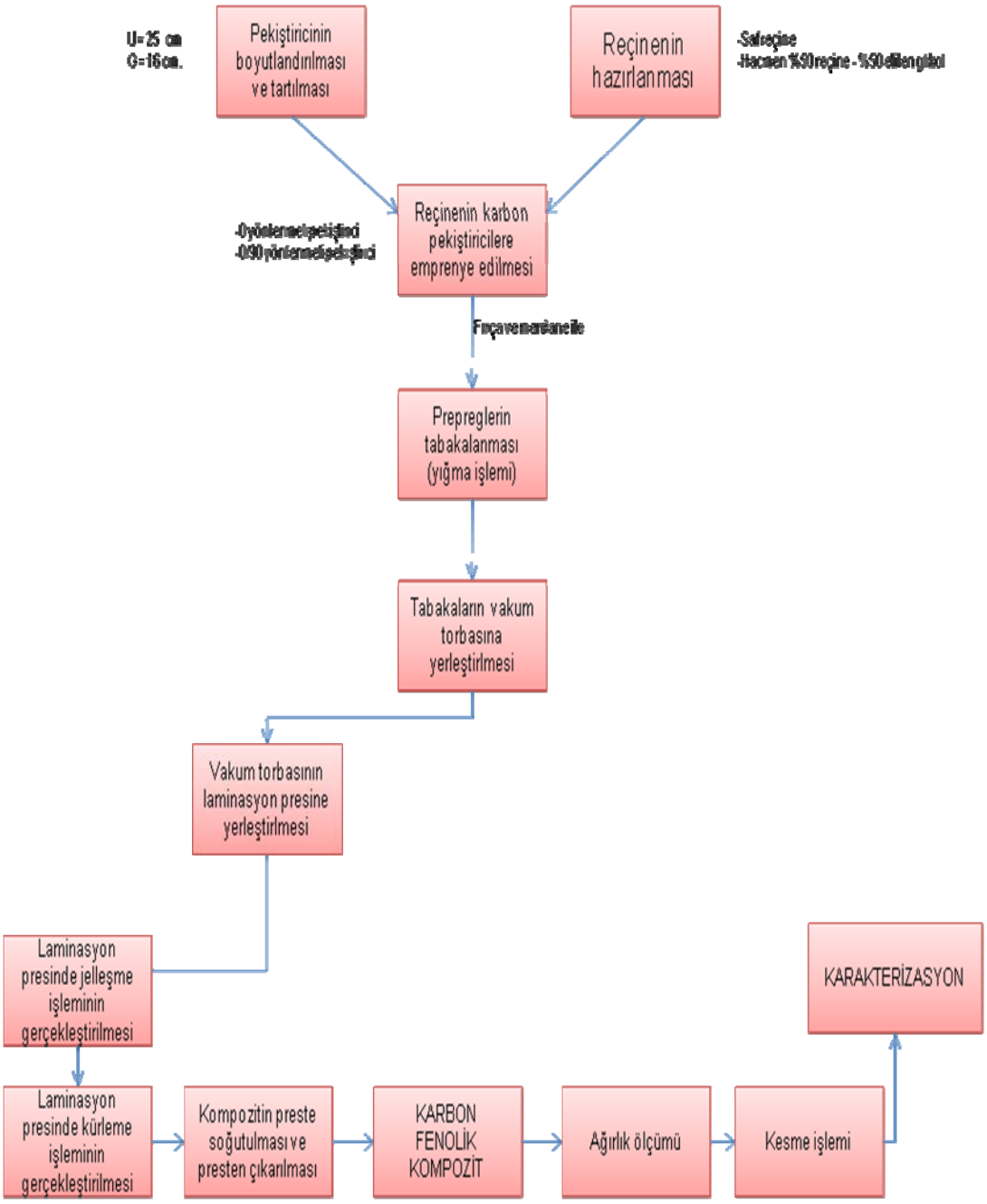


Şekil 6.9 : a) Yüksek sıcaklığa dayanıklı film b) cam elyaf keçe c) bleeder d)Vakum torbasına alınmış, kalıplanmış kompozit

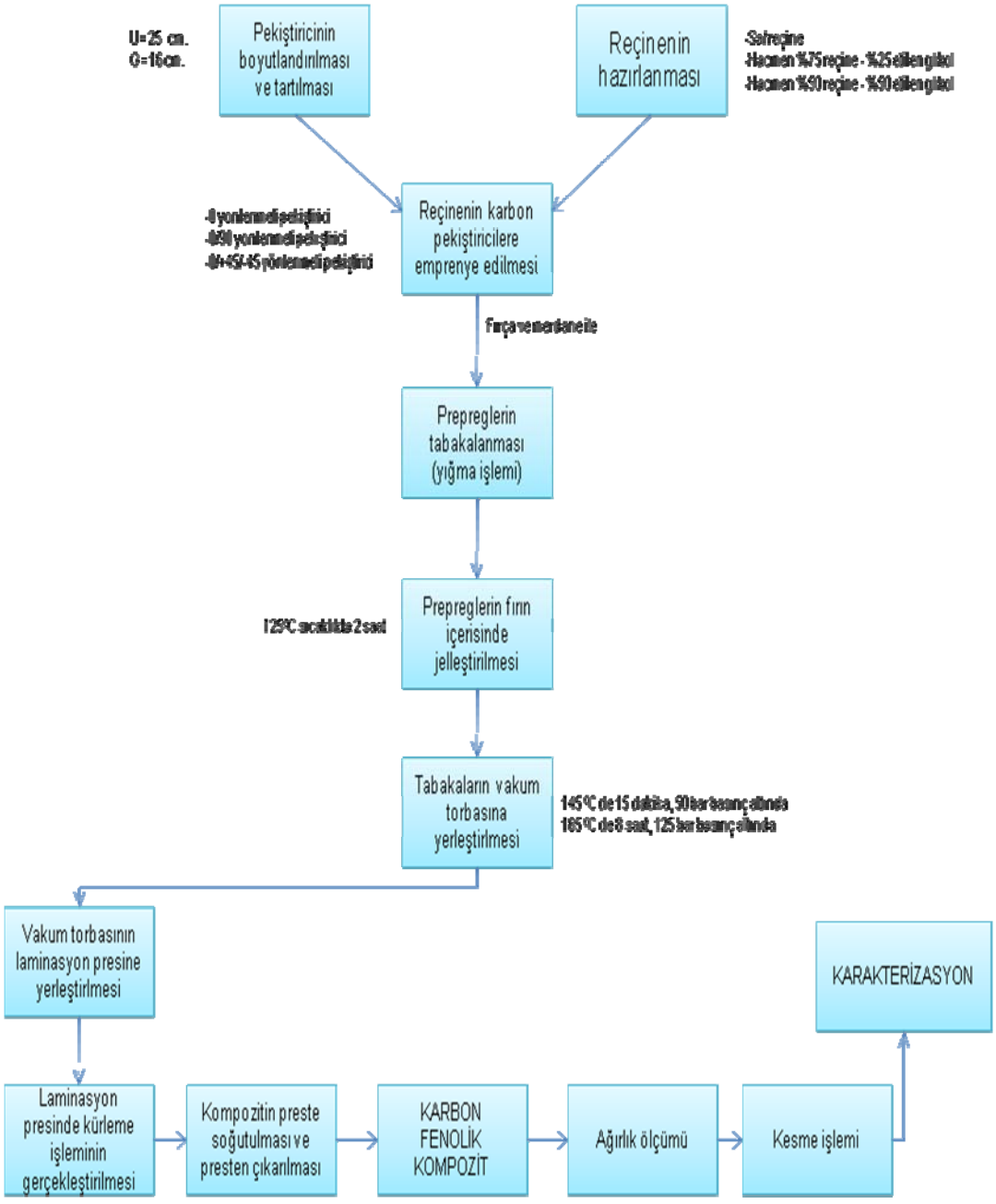
Kompozitlerin reçine içeriği, reçine emdirme işleminden önce tartımı yapılan karbon dokumaların ağırlığı ve kürleme işlemi sonucunda tartımı yapılan kompozit ağırlığından hareket edilerek hesaplanmıştır. Üretilen kompozit levhalara örnek şekil 6.10'da gösterilmiştir.



Şekil 6.10 : Üretilen karbon fenolik kompozit levhanın görünümü.



Şekil 6.11 : Birinci üretim yöntemi proses akış şeması.



Şekil 6.12 : İkinci üretim yöntemi proses akış şeması.

6.5. Sonuçlar ve değerlendirilmeler

6.5.1. Basma testi sonuçları

Birinci ve ikinci üretim koşullarına göre hazırlanan kompozitlerin basma mukavemetleri Tablo 6.2 ve 6.3'de reçine çözeltisinin konsantrasyonu, pekiştirici yönlenmesi, tabaka sayısı ve kompozitteki reçinenin ağırlıkça oranıyla birlikte verilmiştir.

Çizelge 6.2 : İlk üretim koşullarına göre hazırlanan kompozitlerin basma testi sonuçları.

Üretim Parametreleri				**Basma Mukavemeti (MPa)**			**Ortalama**
Reçine Konsant. (% Hacimce)	**Pekiştirici Yönlenmesi (°)**	**Tabaka Sayısı**	**Ağırlıkça Reçine Miktarı (%)**	1	2	3	
100	0	15	18	46	41	73	53 ±19,5
50	0	15	9	6	5	6	5,6 ±0,6

Çizelge 6.3 : İkinci üretim koşullarına göre hazırlanan kompozitlerin basma testi sonuçları.

Üretim Parametreleri				**Basma Mukavemeti (MPa)**					**Ortalama**
Reçine Konsant. (% Hacimce)	Pekiştirici Yönlenmesi (°)	Tabaka Sayısı	Ağırlıkça Reçine Miktarı (%)	1	2	3	4	5	
100	0	9	36	158	154	136	162	130	148 ±14
100	0/ 90	9	36	151	156	159	154	143	152 ±10
100	0 /+45/-45	7	28	97	140	130	124	134	125 ±16
75	0	9	32	134	133	134	135	132	134 ±2
75	0 / 90	9	31	134	125	123	129	131	128±4
75	0/+45/-45	7	26	91	89	98	89	105	94±7

Tablo 6.2'de görüldüğü gibi, birinci yöntemin kullanılması durumunda kompozitteki reçine oranı %100'lük reçine çözeltisi için %18, %50'lik reçine çözeltisi için ise %9'dur. Bu reçine içeriklerine sahip kompozitlerin basma mukavemetleri ise saf reçinenin kullanılması durumunda 53 MPa, %50 reçine çözeltisinin kullanılması durumunda ise 5,6 MPa değerine düşmektedir. Diğer taraftan, ikinci yöntemin kullanılması durumunda kompozitteki reçinenin ağırlık oranı %26 ile %36 arasında değişirken basma mukavemeti ise 94-152 MPa değerlerine yükselmektedir. Yöntemdeki değişimin kompozitteki reçine oranı ve kompozitin basma mukavemeti üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar aynı zamanda

kompozitin üretim tekniğinde yapılan modifikasyonun nedenini de açıklamaktadır. İlk yöntemde sadece 0° yönlenmeye sahip tabakalardan oluşan kompozitler hazırlanmış ve reçine konsantrasyonunun etkisi incelenmiştir. Basma deneyleri sonucunda elde edilen düşük mukavemet değerleri nedeniyle 0°/90° ve 0°/+45°/-45° yönlenmeye sahip kompozitler hazırlanmamıştır. Diğer taraftan, ikinci yöntemle elde edilen sonuçların gösterildiği tablo 6.2'de ise %50 reçine çözeltisinden hazırlanmış kompozitlerin deney sonuçlarının bulunmadığı görülmektedir. Bunun nedeni bu çözeltiden hazırlanan kompozitlerin kesme aşamasında kolayca delamine olmalarından kaynaklanmaktadır. Birinci yöntemle hazırlanan örneklerde reçine içeriğinin düşük olmasının nedeni, daha önceden açıklandığı gibi, başlangıçtan itibaren uygulanan vakumun etkisi ile reçinenin büyük ölçüde yapıdan uzaklaşmasıdır. İkinci yöntem uygulandığında, vakum ve basınç uygulanmadan jelleştirilen reçinenin viskozitesinin artması sonucu daha sonraki basınç ve vakum uygulamalarında yapıdan atılan reçine oranı azalmakta ve kompozitteki reçine oranı %36'lara kadar çıkmaktadır. Bileşik tabakalarda mukavemeti kontrol eden faktörler tek tabakaların kendi mukavemetleri ile tabakalar arasındaki bağ mukavemetidir. Kompozit yapısında yeterli oranda bağlayıcı reçinenin bulunmaması durumunda düşük yüklemeler altında tabakalar arasındaki bağ kopmakta ve delaminasyon şeklinde hasarlar meydana gelmektedir. Kompozitteki reçine içeriğine bağlı olarak basma mukavemetindeki değişim bu şekilde açıklanabilir. Diğer taraftan tablo 6.3'e göre 0° yönlenmeli kompozitin fiber ekseni yönündeki mukavemeti ile 0°/90° yönlenmeye sahip ve reçine oranı aynı (%36) olan kompozitlerin mukavemetlerinin hemen hemen aynı olduğu dikkati çekmektedir. Bu sonuç 0° yönlenmeli fiberlerin bunlara dik fiberlerle desteklenmesi durumunda mukavemeti fark edilir derecede arttırmadığını göstermektedir. Bu ise bileşik tabakanın mukavemetinin esas olarak tabakalar arasındaki bağ ile kontrol edildiği sonucunu doğurmaktadır. Ancak elde edilen bu sonuçlar ve yorumlarda 0° yönlenmeli kompozitin fiber yönündeki mukavemeti karşılaştırmada esas alınmıştır. Yükün 0° yönlenmeli kompozite fiberlere paralel yönde uygulanması durumunda elde edilecek mukavemet değerinin 0°/90° yönlenmeye sahip kompozitin basma mukavemetinin altında olması beklenir.

Şekil 6.13'de standartlara göre kesilmiş basma dayanımı testi numunelerine örnek gösterilmiştir.



Şekil 6.13 : Üretilen plakalardan kesilmiş basma testi numuneleri.

6.5.2.Çekme testi sonuçları

Çizelge 6.4 : İlk üretim koşullarına göre üretilmiş numunelerin çekme testi sonuçları.

Üretim Parametreleri				**Çekme Mukavemeti (MPa)**			**Ortalama**
Reçine Konsant. (% Hacimce)	Pekiştirici Yönlenmesi (°)	Tabaka Sayısı	Ağırlıkça Reçine Miktarı (%)	1	2	3	
100	0	15	18	130	133	147	136 ±13,5
50	0	15	9	126	92	100	106 ±20

Çizelge 6.5 : İkinci üretim koşullarına göre üretilmiş numunelerin çekme testi sonuçları.

Üretim Parametreleri				**Çekme Mukavemeti (MPa)**					**Ort.**
Reçine Konsan. (%Hacimce)	Pekiştirici Yönlenmesi (°)	Tabaka Sayısı	Ağırlıkça Reçine Miktarı (%)	1	2	3	4	5	
100	0	9	36	351*	343*	359*	358*	345*	>351*
100	0 / 90	9	36	361*	357*	361*	352*	357*	>358*
100	0/+45 /-45	7	28	232	193	198	198	210	206
75	0	9	32	337*	342*	354*	352*	345*	>346*
75	0 / 90	9	31	312	343	313	325	350	328
75	0/+45/-45	7	26	264	259	260	258	244	257

Farklı jelleştirme yöntemlerinin uygulandığı örneklerin çekme testi sonuçları tablo 6.4 ve 6.5'de verilmiştir. Basma testleri ile elde edilen sonuçlar arasındaki benzerlikler bu tablolardan da açıkça görülmektedir. Reçine viskozitesinin artmasını ve böylece vakum ve basınç uygulaması sırasında yapıda kalan bağlayıcı reçine miktarının yükselmesini sağlayan ikinci yöntemin kullanılması durumunda çekme mukavemetlerinde yaklaşık 4 kata varan bir artış sağlanmaktadır. Tablo 6.5'de verilen "> *" simgeli ortalama çekme mukavemeti değerleri çekme testi sırasında koparılamayan örneklerin mukavemet değerleri olup, çekme testi cihazının maksimum yükü (3 ton) ve test örneklerinin yüzey alanlarına göre hesaplanmış olan değerlerdir. 0°/+45°/-45° yönlenmeli dokumalardan elde edilen kompozitlerin mukavemetinin, 0° ve 0°/90° yönlenmeye sahip dokumaların kompozitlerinden daha düşük olduğu dikkati çekmektedir. Benzer davranış basma mukavemeti testlerinde de

gözlenmiştir. Bu tür yönlenmeye sahip kompozitlerin reçine içeriğinin 0° ve 0°/90° yönlenmeli kompozitlerden %8-10 kadar düşük olduğu görülmektedir. Bunun iki muhtemel nedenden kaynaklanması mümkündür; birincisi, sıkı ve daha kalın dokuma yapısına reçine emdirilmesindeki zorluk, ikincisi ise kürleşme sırasında ortaya çıkan su buharının bu sıkı ve kalın tabakalardan kolay uzaklaştırılamamasıdır.

Aynı dokumadan elde edilen %100 ve %75'lik reçine çözeltisinin mukavemetleri arasında yaklaşık 50 MPa'lık bir farkın olduğu tablo 6.5'den görülmektedir. %75'lik reçine çözeltisi kullanıldığında viskozitenin düşmesi sonucu reçinenin emdirilmesinin ve su buharının uzaklaştırılmasının daha kolay olması sonucu gözlenen mukavemet farkının ortaya çıkması beklenebilir. Elde edilen bu sonuç ve yorumlar, aynı dokuma ve aynı reçine oranları için basma testi sonuçları ile çelişkili görünmektedir. Bu çelişkinin muhtemel bir nedeni örnek hazırlama aşamasında dokumaya reçine emdirilmesindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Elle kalıplama gibi tekniklerde reçine emdirilmesi otomatik ve tekrarlanabilir aynı koşullar altında gerçekleşmediğinden bu tür farklılıkların ortaya çıkması beklenebilir. Basma testine benzer şekilde, çekme testlerinde de tabakalar arası bağ mukavemetinin kompozit mukavemetini kontrol eden kritik bir faktör olduğu ve kompozitteki bağlayıcı reçine oranının kritik bir değeri aşması gerektiği açıkça anlaşılmaktadır.

6.5.3. Isıl karakterizasyon

Üretilen kompozitlere uygulanan dinamik ve statik ısı akısı testleriyle ısıl iletkenlik test sonuçları tablo 6.6 – 6.11'de verilmiştir.

Tablo 6.6 ve 6.7'de verilen dinamik ısı akısı test sonuçlarında ağırlık kayıplarının fırında jelleştirme işleminin uygulanmaması durumunda ortalama %8-11, fırında jelleştirme işleminin uygulanması durumunda ise ortalama %15-20 arasında olduğu görülmektedir. Ölçülen ağırlık kayıpları test sırasında reçine yanması sonucu meydana gelmektedir. Fırında jelleştirme durumunda kompozit yapısında tutulan reçine oranı arttığından test sırasında meydana gelen ağırlık kaybı da artmaktadır. Belirlenen bu ağırlık kayıpları, ısıl koruma uygulamaları için öngörülen ağırlık kayıpları sınırları içindedir. Bu açıdan kompozitler uygun ısıl özelliğe sahiptirler.

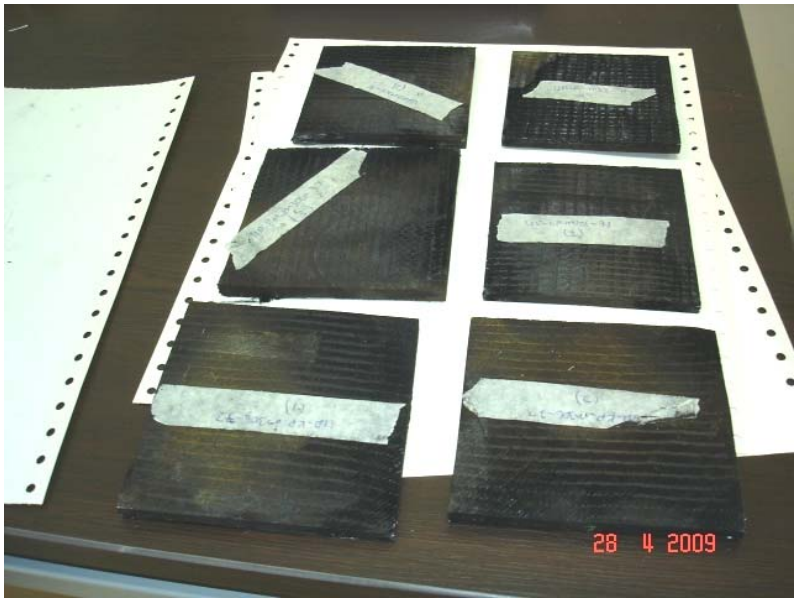
Çizelge 6.6 : Birinci üretim koşullarına göre üretilen kompozitlerin dinamik ısı akısı testi sonuçları.

Üretim Parametreleri				**% Ağırlık Kaybı**			**Ortalama**
Reçine Konsan. (% Hacimce)	Pekiştirici Yönlenmesi (°)	Tabaka Sayısı	Ağırlıkça Reçine Miktarı (%)	1	2	3	
100	0	25	18	11	11	11	11 ±1,53
50	0/ 90	25	9	7	9	10	8 ±1,23

Çizelge 6.7 : İkinci üretim koşullarına göre üretilen kompozitlerin dinamik ısı akısı testi sonuçları.

Üretim Parametreleri				**% Ağırlık Kaybı**			**Ortalama**
Reçine Konsan. (% Hacimce)	Pekiştirici Yönlenmesi (°)	Tabaka Sayısı	Ağırlıkça Reçine Miktarı (%)	1	2	3	
100	0	13	34	16	14	13	15 ±1,53
100	0/ 90	9	34	18	15	16	16 ±1,53
100	0/+45/-45	7	34	16	16	16	16
75	0	13	35	21	21	21	21
75	0/ 90	13	34	20	20	21	20±0,57
75	0/+45/-45	9	27	14	15	15	14 ±0,57

Teste tabi tutulan örneklerin test sonrası görünümleri şekil 6.14'de görülmektedir.



Şekil 6.14 : Üretilen kompozitlerin dinamik ısı akısı testi sonrası görünümü.

Statik ısı akısı testi ile belirlenen kupon arkası sıcaklıklar ise tablo 6.8 ve 6.9'da gösterilmiştir. Reçine içeriğinin kupon arkası sıcaklığına olan etkisi tablolardan görülmektedir. Isıl iletkenliği daha düşük olan reçine oranının artmasıyla kupon arkası sıcaklıklar beklenildiği gibi düşmektedir. Dikkati çeken diğer bir faktör ise en düşük kupon arkası sıcaklıklarının 0°/+45°/-45° kompozitlerinde gözlenmesidir. Bunun nedeni tam olarak açıklanamamakla birlikte, eksenel ve radyal yönlerde anizotropik davranış gösteren karbon flamanlarının bu üç yönde dağılmaları sonucu daha homojen bir sıcaklık dağılımına neden olmalarından kaynaklanabilir. Bunun yanı sıra, üç eksenli dokumalarda kürleşme sırasında ortaya çıkan gazların yapıdan uzaklaştırılmalarındaki zorluk sonucu meydana gelen gaz boşluklarının da ısı yalıtım etkisi göstererek kupon arkası sıcaklıkların düşmesine katkıda bulunması beklenebilir.

Çizelge 6.8 : İlk üretim koşullarına göre üretilmiş kompozitlerin statik ısı akısı testi sonuçları.

Üretim Parametreleri				**Kupon Arkası Sıcaklık (T)**			**Ortalama**
Reçine Konsan. (% Hacimce)	Pekiştirici Yönlenmesi (°)	Tabaka Sayısı	Ağırlıkça Reçine Miktarı (%)	1	2	3	
100	0	15	18	35	31	32	33 ±3
50	0	15	9	45	46	36	42 ±5,5

Çizelge 6.9 : İlk üretim koşullarına göre üretilmiş kompozitlerin statik ısı akısı testi sonuçları.

Üretim Parametreleri				**Sıcaklık Farkı (ΔT)**			**Ortalama**
Reçine Konsan. (% Hacimce)	Pekiştirici Yönlenmesi (°)	Tabaka Sayısı	Ağırlıkça Reçine Miktarı (%)	1	2	3	
100	0	13	34	40	23	13	25 ±14
100	0 / 90	9	34	33	24	29	28 ±4,5
100	0/+45/-45	7	34	11	6	11	9 ±3
75	0	13	35	13	6	25	15 ±10
75	0/90	13	34	15	11	12	13±2
75	0/+45/-45	9	27	6	7	9	7±1,5

Kompozitlerin ısı iletkenliği ölçüm sonuçları, fırında jelleştirme işleminin uygulandığı örnekler için tablo 6.10'da verilmiştir. Isıl iletkenlik değerlerinin yaklaşık 0,6 – 0,7 W/m^2 °C aralığında kaldığı görülmektedir. Kompozitlerdeki reçine oranının yakın değerlerde olması nedeniyle ölçülen ısıl iletkenlik değerlerinin de yakın olduğu anlaşılmaktadır. Isı kalkanı uygulamaları için kompozitin ısıl iletkenliğinin 0,8 W/m^2 °C değerinden yüksek olmaması gerektiği göz önünde tutulduğunda elde edilen bu sonuçların bu açıdan uygun olduğu söylenebilir.

Çizelge 6.10 : İkinci üretim koşullarına göre üretilen kompozitlerin ısıl iletkenlik ölçümü sonuçları (fırında jelleştirmeyle üretim)

Üretim Parametreleri				**Isıl İletkenlik W/m°C**
Reçine Konsan. (% Hacimce)	**Pekiştirici Yönlenmesi (°)**	**Tabaka Sayısı**	**Ağırlıkça Reçine Miktarı (%)**	
100	0	13	34	0,51
100	0/ 90	9	34	0,6
100	0/ +45/ -45	7	28	0,66
75	0	13	32	0,64
75	0/ 90	13	34	0,78
75	0/ +45/ -45	9	27	0,59

İkinci üretim koşullarına göre üretilmiş (fırında jelleştirme ile) kompozitlerin yoğunlukları tablo 6.11'de verilmiştir. Ölçülen yoğunlukların ortalama 1,5 g/cm^3 mertebesinde olduğu görülmektedir. Sivil ve askeri amaçlı uçak, uzay araçları ve roket gibi uygulamalarda mukavemetin yanı sıra hafiflik de önem kazanmaktadır. Bu nedenle bu tür uygulamalar için özgül mukavemet ve özgül modül özellikleri ön plana çıkmaktadır. Tablo 6.11'de verilen yoğunluk değerleri bu tür uygulamalar için uygun değerlerdedir.

Çizelge 6.11 : İkinci üretim koşullarına göre üretilmiş kompozitlerin yoğunluk değerleri.

Üretim Parametreleri				Yoğunluk g/cm^3
Reçine Konsan. (% Hacimce)	Pekiştirici Yönlenmesi (°)	Tabaka Sayısı	Ağırlıkça Reçine Miktarı (%)	
100	0	13	34	1,49
100	0/ 90	9	34	1,53
100	0/ +45/ -45	7	28	1,55
75	0	13	32	1,46
75	0/ 90	13	34	1,48
75	0/ +45/ -45	9	27	1,55

7. GENEL DEĞERLENDİRME ve ÖNERİLER

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar genel olarak aşağıdaki gibi değerlendirilebilir;

1- Kompozitlerin çekme ve basma testleri ile belirlenen mekaniksel özellikleri bağlayıcı olarak kullanılan reçine oranından önemli derecede etkilenmektedir. Kompozitlerin çekme ve basma mukavemetlerini kontrol eden asıl faktör tek tabakaların mukavemetlerinden çok tabakalar arasındaki bağ mukavemetidir.

2- Mukavemet ve ısıl özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenen kompozitteki reçine içeriği, esas olarak jelleştirme koşulları ile kontrol edilebilir. Bu koşullar basınç ve vakum uygulamaları sırasında aşırı reçine kaybını önleyecek şekilde seçilmelidir. Yapılan çalışmalarda reçine emdirilmiş ve tabakalanmış kompozitlere, fırında basınç ve vakum uygulanmaksızın, kullanılan reçine çözeltisinin konsantrasyonuna bağlı olarak 125°C'de 2-2,5 saatlik bir jelleştirme işleminin uygulanmasının uygun olduğu belirlenmiştir.

3- Deneysel çalışmalarda kullanılan %50, %75 ve %100'lük reçine çözeltileri içinde en uygun konsantrasyonların %75'lik ve %100'lük olduğu belirlenmiştir. Reçine çözeltisi konsantrasyonu %50 olduğunda uygun viskoziteye sahip jelleşme gerçekleşmemekte ve bunun sonucu tabakalar arasında kuvvetli bağların oluşumunu sağlayacak reçine düzeyine ulaşılamamaktadır.

4- Isı kalkanı gibi uygulamalarda mukavemet ve ısıl özelliklerin yanı sıra uçuşun dinamik koşulları altında malzemenin vibrasyon, termal şok dirençleri de önem kazanmaktadır. Bu nedenle, çalışılan malzemelerin bu özelliklerinin de vibrasyon ve termal şok testlerinden geçirilmesi uygulanabilirliklerinin belirlenmesi açısından gerekli ve yararlı olacaktır.

8. KAYNAKLAR

[1] **Miracle D.B, Donaldson S.L.,** Air Force Research Laboratory, *Introduction to Composites, ASM International, Composites, Volume 21, ASM Handbook.* 2001.

[2] **Enşici, A.,** *Polimer Esaslı Kompozit Malzemeler ve Ürün Tasarımında Kullanımları,* makale, 2004.

[3] **Çizmeci, Ö.S.,** *Roket ve Füzelerde Kompozit Malzeme Kullanımının İncelenmesi,* Yıldız Teknik Üniversitesi Lisans Bitirme Tezi, Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Anabilim Dalı, İstanbul, 2006.

[4] **Solmaz, M.Y., Gür, M.,** *Tabakalı Kompozit Plakalarda Takviye Malzemesi ve Oryantasyon Açısının Gerilme Analizine Etkisi,* Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü., 2007.

[5] **Gardziella, A., Pilato, L.A.**, *Phenolic Resins Chemistry, Applications, Standardization, Safety and Ecology,* Springer-Verlag, 1999

[6.] **Qureshi, S.P.,** *Phenolic Resins*, Georgia-Pacific Resins, Inc. ASM International Composites Volume 21 ASM Handbook, 2001.

[7.] **Zingaro, J.R.,** *Phenolic Composites in the Aircraft Industry and the Necessary Transition to the Mass Transit Rail Industry,* paper presented at the 51st Annual Conf., Composites Institute, Society of the Plastics Industry Inc., 1996.

[8] **Demirkesen, E.,** *Kompozit Malzemeler*

[9] http://www.ale.nl/ale/index.php?cid=71 24.12.2008

[10] **Albayrak, E.,** *Kompozit Plakaların Darbe Yüklerine Karşı Davranışlarının Belirlenmesi,* Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Müh. Bölümü, 2007.

[11] **Dokur, M.,** *Karbon Fiber Esaslı Polimerik Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu,* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2008.

[12] http://www.compositetechnology.blogspot.com 24.12.2008

[13] **Alemdaroğlu, N., Kayran, A.,** *Vakum Torbalama Yöntemi ile Kompozit Malzemeden Yapı Üretimi Örnek Bir Havacılık Uygulaması,* Makale, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü.

[14] http://www.ale.nl/ale/index.php?cid=74 12.01.2009

[15] http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=401 05.03.2009

[16] http://www.kompozit.net/pinfo.asp?pid=335 17.02.2009

[17] **Giordano, M., Iannace, S.** *Polymeric Composite Materials,* Universitá Federico II, Napoli, Italy.

[18] **Bacon, R., Moses, C.T.,** *High-Performance Polymers—Their Origin and Development*, s.341, 1986.

[19] *Zoltek Corporation 1994 Annual Report*, St. Louis, 1995.

[20] **Handbook, Department Of Defense.** *Composite Materials Handbook Volume 3 Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design and Analysis.* 2002.

[21] **Walsh, P.J.,** Zoltek Corporation, *ASM International -Composites- Volume 21-ASM Handbook,* 2001.

[22] **Donnet, J.B., Bansal, R.C.,** *Carbon Fibers*, 2nd ed., Marcel Dekker, s. 55, 1990.

[23] **Krock, R.P., Carolos, D.,** *Versatility of Short Pitch-Based Carbon Fibers in Cost Efficient Composites*, 42nd Conf. of Composites Institute, SPI, 1987.

[24] **D'Abate, G.D., Diefendorf, R.J.,** *The Effect of Heat on the Structure and Properties of Mesopause Precursor Carbon Fibers,* Proc. of the 17th Biennial Conf. on Carbon, American Carbon Society, 1985.

[25] **LeMaistre, C.W., Diefendorf, R.J.,** *The Origin of Structure in Carbonized PAN Fibers*, *SAMPE Q.*, Vol 4, 1973.

[26] **Diefendorf, R.J., Takorsky, E.W.,** *The Relationships of Structure to Properties in Graphite Fibers,* Part I, 1971.

[27] **Diefendorf, R.J., Takorsky, E.W.,** *The Relationships of Structure to Properties in Graphite Fibers,* Part II, 1973.

[28] **Singer, L.**, *Overview of Carbon Fiber Technology,* Material Technology Center Newsletter, Southern Illinois Univ. at Carbondale, Spring 1994.

[29] **Awerback, J., Hahn, H.T.,** *Fatigue and Proof Testing of Unidirectional Graphite/ Epoxy Composites, Fatigue of Filamentary Composite Materials*, Am. Soc. for Testing and Materials, 1977.

[30] **Chiao, T.T., Sherry, R.J.,** *Lifetimes of Fiber composites Under Sustained Tensile Loading*, Proceedings of the 1977 Int. Conf. on Fracture Mechanics and Technology, 1977.

[31] **Feldman, L.A.,** *High Temperature Creep Effects in Carbon Yarns and Composites*, Proceedings of the 17th Biennial Conference on Carbon, American Carbon Society, 1985.

[32] **Kelly, A.,** *Concise Encyclopedia of Composite Materials* Revised ed., R.W. Cahn and M.B. Beaver, Ed., Pergamon, Elsevier Science Ltd., Oxford, 1994.

[33] **Haldeman, C.W.,** United states patent, 4,016,322, a*blative protective material for reentry bodies*, 1977.

[34] **Sarıkaya, A., Gülbiten, Ö.**, *Kompozit Isı Kalkanı Tasarımı,* İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya Metalurji Fakültesi, Bitirme Ödevi, 2008.

[35] http://science.ksc.nasa.gov/ 11.02.2009

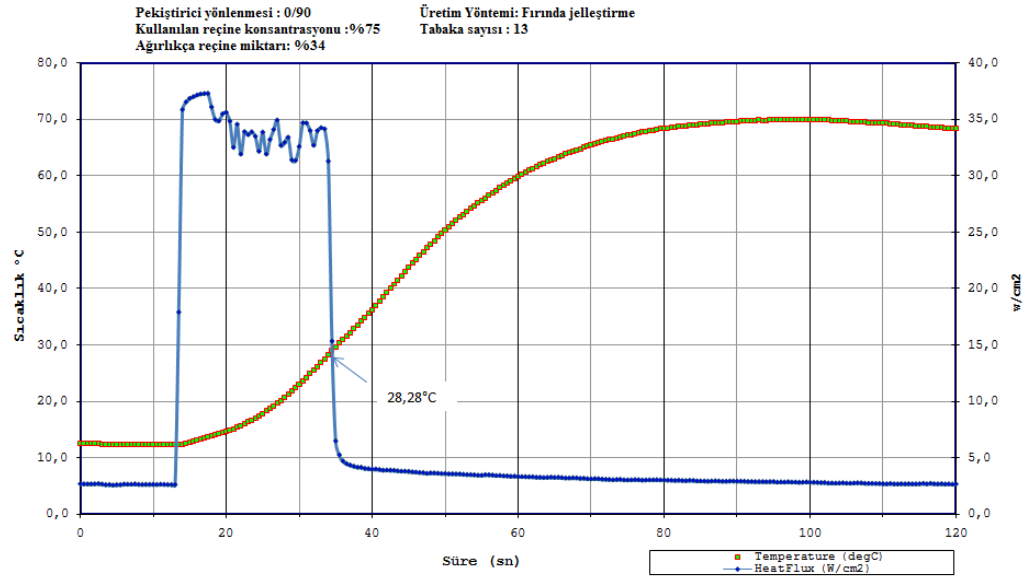
[36] http://www.spacex.com/updates_archive.php?page=121007 21.11.2008

9.EKLER

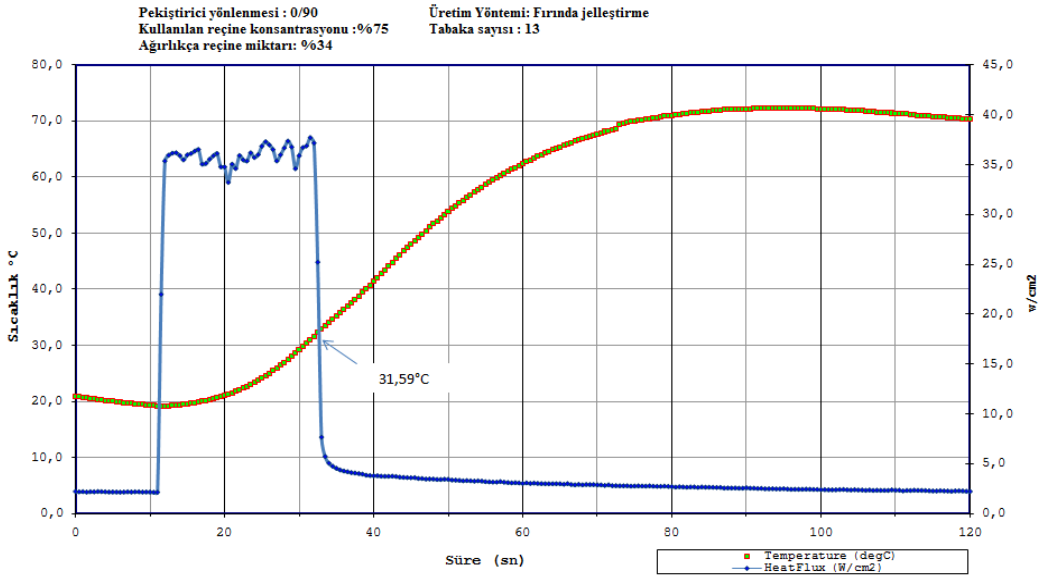
EK1: Statik ısı akısı test sonucu elde edilen sıcaklık-süre değişimi grafikleri.

EK2: Dinamik ısı akısı sonucu elde edilen sıcaklık-süre değişim grafikleri.

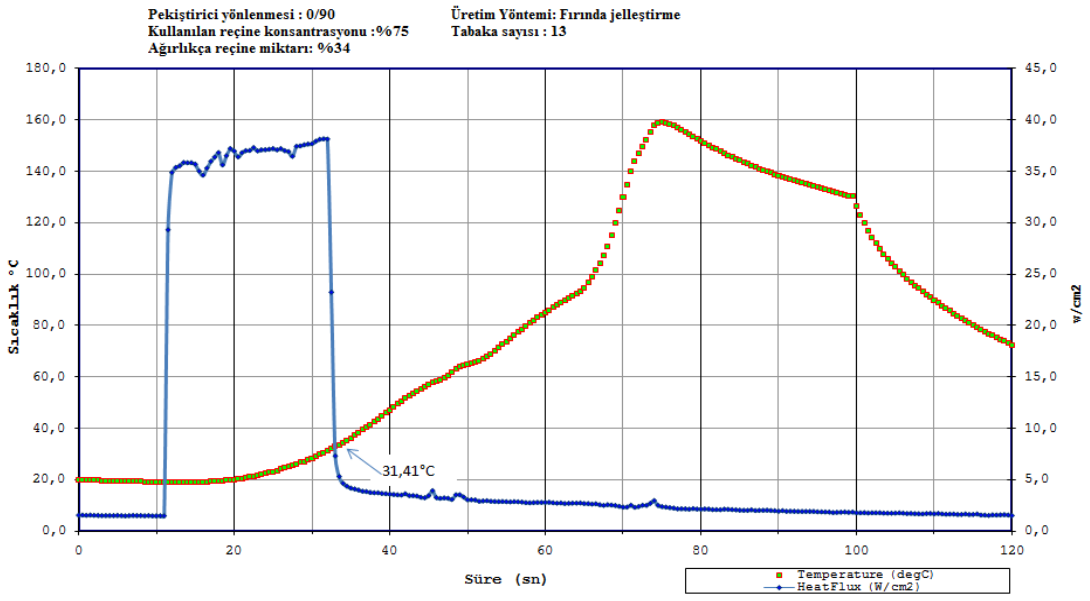
EK1:



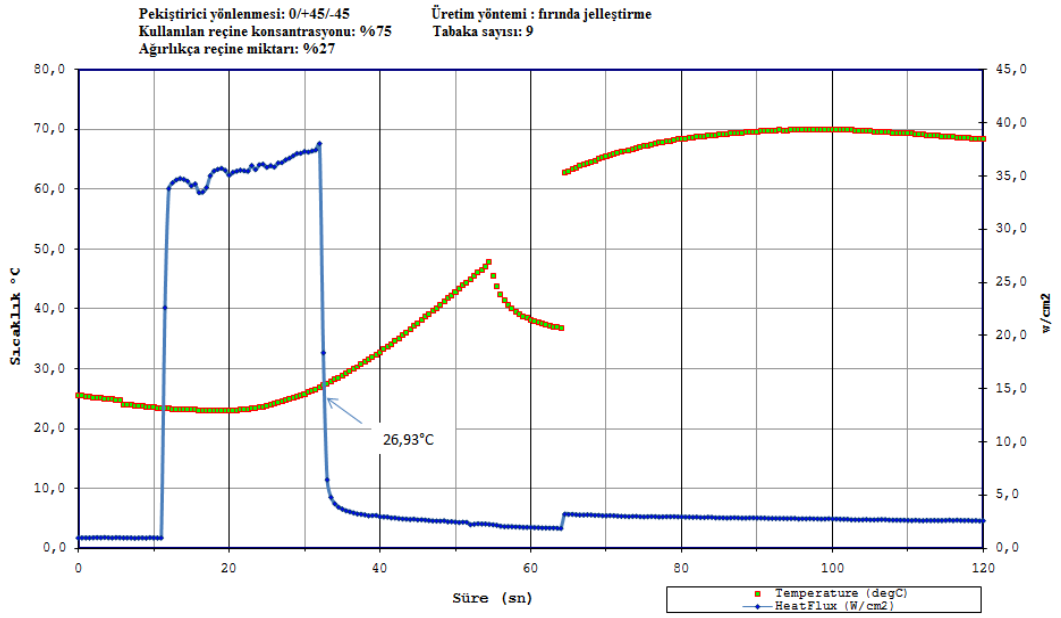
Şekil 9.1 a.: 0/90 pekiştirici yönlenmeli, %75 reçine konsantrasyonu kullanılan, fırında jelleştirmeyle üretilmiş kompozitin statik ısı akısı testi sonuçları (1'inci numune)



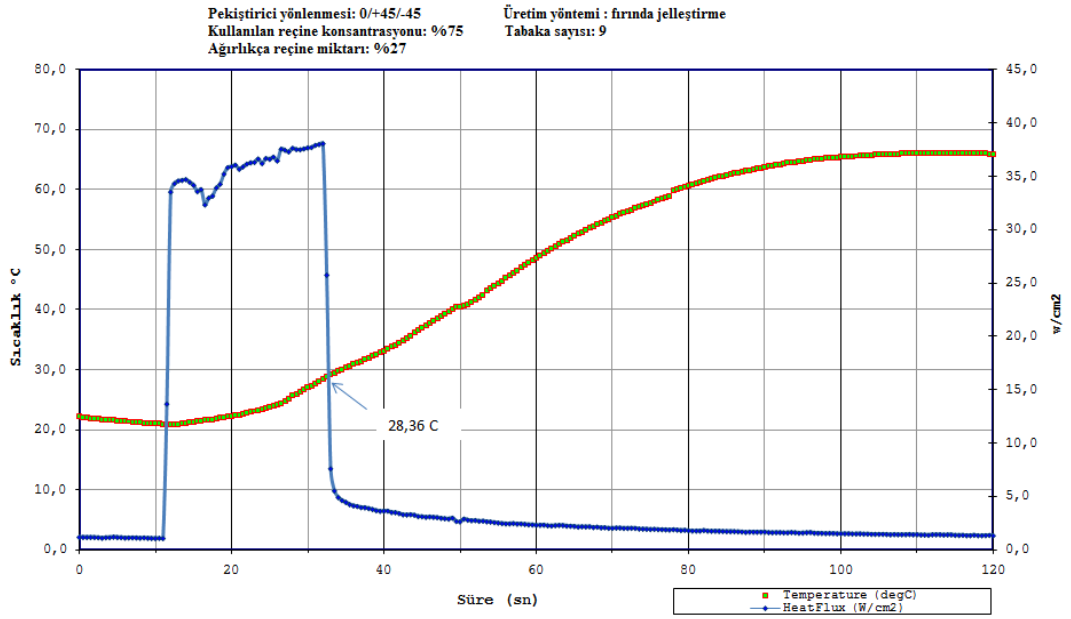
Şekil 9.1 b.: 0/90 pekiştirici yönlenmeli, %75 reçine konsantrasyonu kullanılan, fırında jelleştirmeyle üretilmiş kompozitin statik ısı akısı testi sonuçları (2'nci numune)



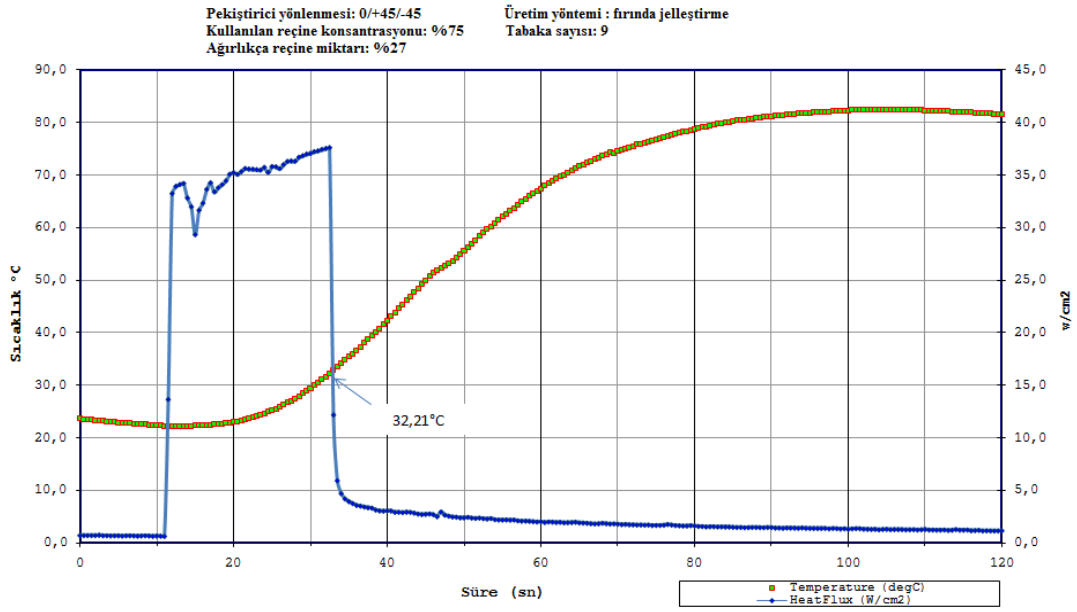
Şekil 9.1 c.: 0/90 pekiştirici yönlenmeli, %75 reçine konsantrasyonu kullanılan, fırında jelleştirmeyle üretilmiş kompozitin statik ısı akısı testi sonuçları (3'üncü numune)



Şekil 9.2.a : 0/+45/-45 pekiştirici yönlenmeli, %75 reçine konsantrasyonu kullanılan, fırında jelleştirmeyle üretilmiş kompozitin statik ısı akısı testi sonuçları (1'inci numune)

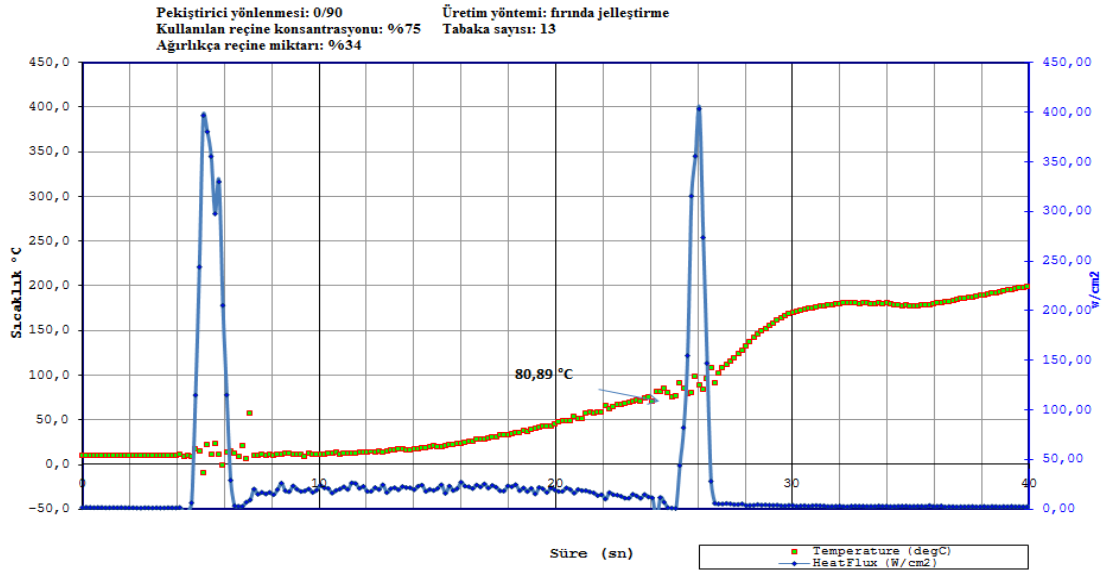


Şekil 9.2.b : 0/+45/-45 pekiştirici yönlenmeli, %75 reçine konsantrasyonu kullanılan, fırında jelleştirmeyle üretilmiş kompozitin statik ısı akısı testi sonuçları (2'nci numune)

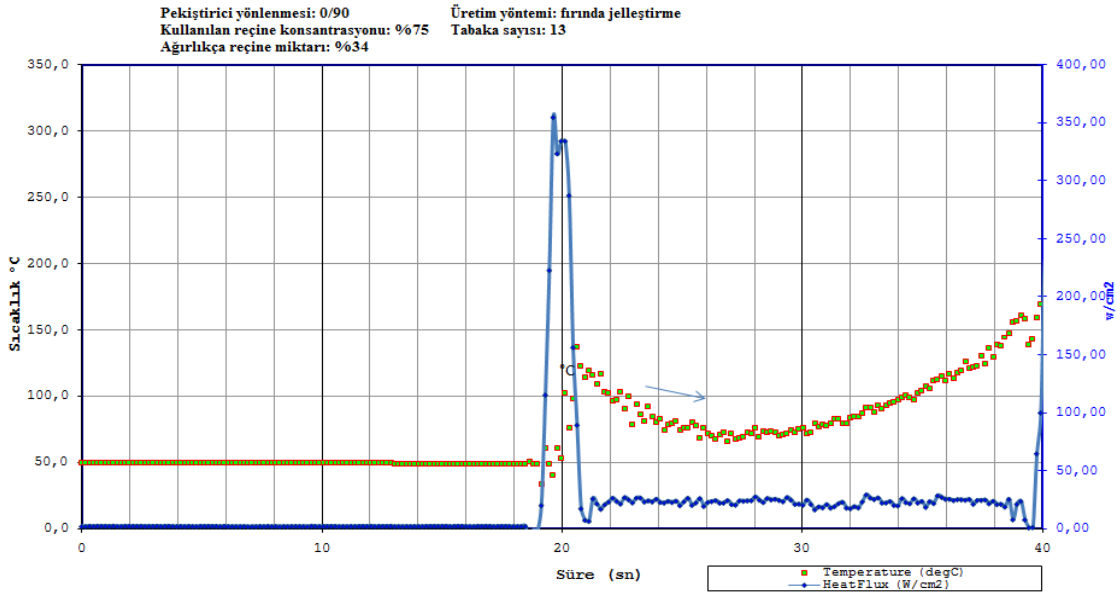


Şekil 9.2.c : 0/+45/-45 pekiştirici yönlenmeli, %75 reçine konsantrasyonu kullanılan, fırında jelleştirmeyle üretilmiş kompozitin statik ısı akısı testi sonuçları (3'üncü numune)

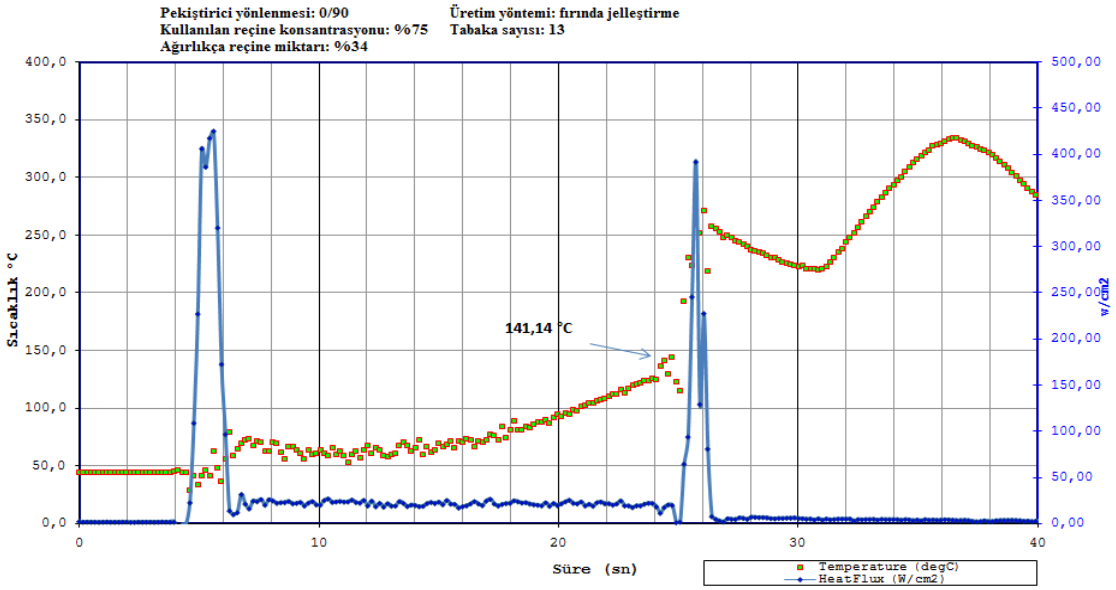
EK2:



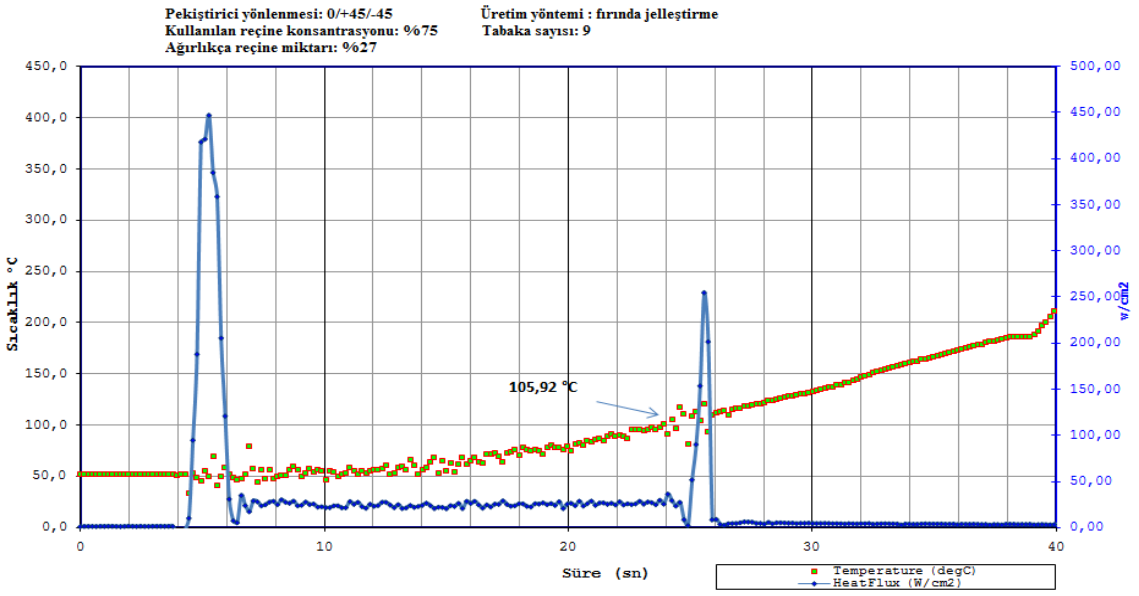
Şekil 9.3.a : 0/90 pekiştirici yönlenmeli, %75 reçine konsantrasyonu kullanılan, fırında jelleştirmeyle üretilmiş kompozitin dinamik ısı akısı testi sonuçları (1'inci numune)



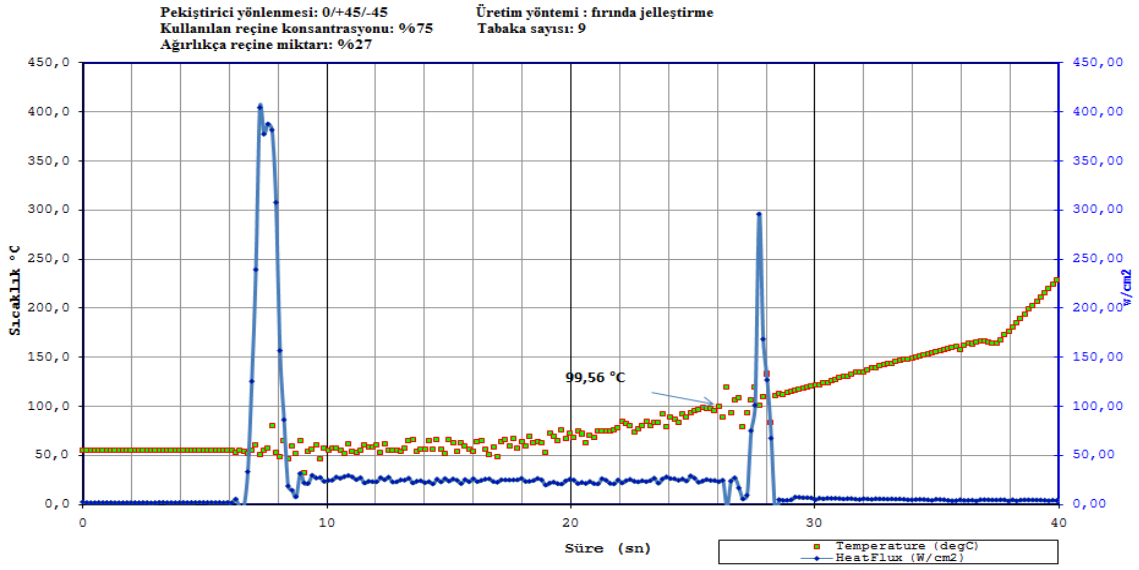
Şekil 9.3.b : 0/90 pekiştirici yönlenmeli, %75 reçine konsantrasyonu kullanılan, fırında jelleştirmeyle üretilmiş kompozitin dinamik ısı akısı testi sonuçları (2'nci numune)



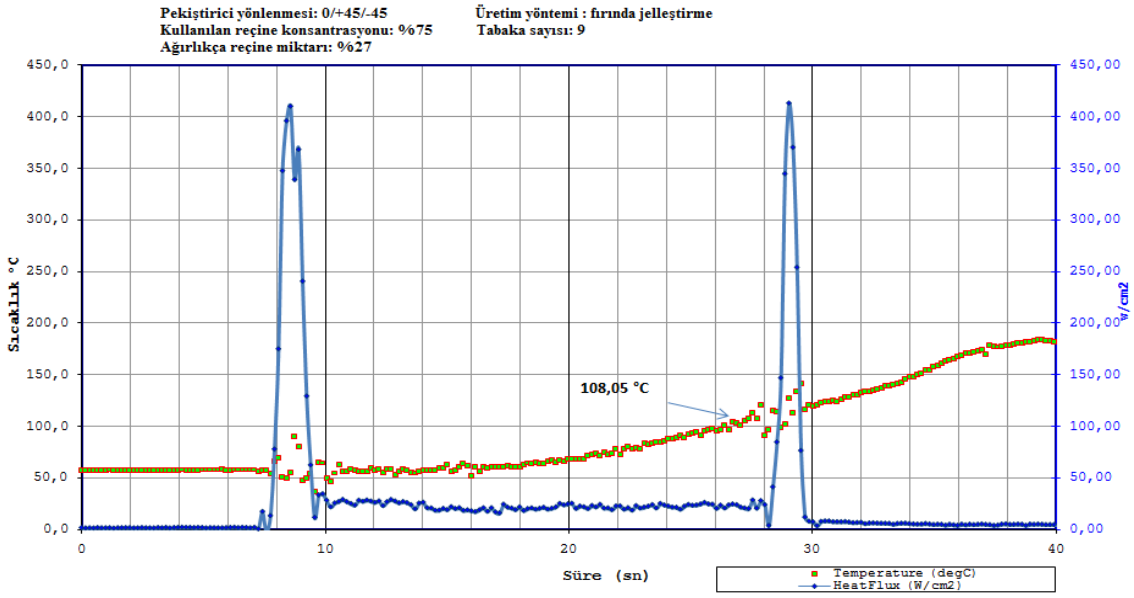
Şekil 9.3.c : 0/90 pekiştirici yönlenmeli, %75 reçine konsantrasyonu kullanılan, fırında jelleştirmeyle üretilmiş kompozitin dinamik ısı akısı testi sonuçları (3'üncü numune)



Şekil 9.4.a : 0/+45/-45 pekiştirici yönlenmeli, %75 reçine konsantrasyonu kullanılan, fırında jelleştirmeyle üretilmiş kompozitin dinamik ısı akısı testi sonuçları (1'inci numune)



Şekil 9.4.b : 0/+45/-45 pekiştirici yönlenmeli, %75 reçine konsantrasyonu kullanılan, fırında jelleştirmeyle üretilmiş kompozitin dinamik ısı akısı testi sonuçları (2'nci numune)



Şekil 9.4.c : 0/+45/-45 pekiştirici yönlenmeli, %75 reçine konsantrasyonu kullanılan, fırında jelleştirmeyle üretilmiş kompozitin dinamik ısı akısı testi sonuçları (3'üncü numune)

ÖZGEÇMİŞ

21.10.1983 Tarihinde Çankırı'da doğdu. 2001 yılında Balıkesir Sırrı Yırcalı Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. Aynı yıl Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı. Lisans eğitiminde, alüminyum alaşımlarının dökümü ve alüminyum silisyum alaşımları konusunda çalıştı. 2007 yılında halen devam etmekte olan, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Mühendisliği programında yüksek lisans eğitimine başladı. 2008 yılında Erasmus öğrenci değişim anlaşmasıyla, Eindhoven Teknik Üniversitesinde titanyum dioksit katalizör üretimi konusunda proje çalışması yaptı.