

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KİMYA ANABİLİM DALI**

**KAPALI BANYO PULTRÜZYON YÖNTEMİYLE PROFİL
ÜRETMEK İÇİN KALIP BOYUNCA SICAKLIK
KONTROLÜ**

**Hazırlayan
Cemil Safa GÜLSEVER**

**Danışman
Prof. Dr. Yahya GÜZEL**

Yüksek Lisans Tezi

**Şubat 2024
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KİMYA ANABİLİM DALI**

**KAPALI BANYO PULTRÜZYON YÖNTEMİYLE PROFİL
ÜRETMEK İÇİN KALIP BOYUNCA SICAKLIK
KONTROLÜ**

Yüksek Lisans Tezi

**Hazırlayan
Cemil Safa GÜLSEVER**

**Danışman
Prof. Dr. Yahya GÜZEL**

**Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
tarafından FYL-2022-11819 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Şubat 2024
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Cemil Safa GÜLSEVER

“Kapalı banyo pultrüzyon yöntemiyle profil üretmek için kalıp boyunca sıcaklık kontrolü” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Cemil Safa Gülsever

Danışman

Prof. Dr. Yahya GÜZEL

Kimya Bölümü ABD Başkanı

Prof. Dr. İlhan Özer İLHAN

İmza

TEŞEKKÜR

Bana çalışmalarım süresince her türlü yardımı ve fedakârlığı sağlayan, başta annem ve babam olmak üzere, kardeşlerime, arkadaşlarıma ve sayın danışmanım Prof. Dr. Yahya GÜZEL teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda çalışma süresince bilgilerinden ve tecrübelerinden yararlandığım Kuşat CNC isimli firma sahibi İzzet KUŞAT ve Korkmaz Elektrik ve Elektronik ve Otomasyon Sistemleri adlı firma sahibi Kubilay KORKMAZ' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Cemil Safa GÜLSEVER

Şubat 2024, KAYSERİ

KAPALI BANYO PULTRÜZYON YÖNTEMİYLE PROFİL ÜRETMEK İÇİN KALIP BOYUNCA SICAKLIK KONTROLÜ

Cemil Safa GÜLSEVER

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Şubat 2024
Danışman: Prof. Dr. Yahya GÜZEL

ÖZET

Pultrüzyon, fiber takviyeli kompozit profillerin üretimi için kullanılan maliyet etkin ve yüksek otomasyonlu bir teknolojidir. Standart bir açık banyo pultrüzyon düzeninde, fiber takviye malzemelerini sıvı reçine ile doldurulmuş bir tankta ısılatmak için kullanılır. Güvenlik ve sağlık için iş yeri düzenlemelerinin sıkılaşması, yeni reçine tiplerinin pultrüzyon pazarına sunulması ve birçok sektördeki daha yüksek ürün kalitesinin talep edilmesi gibi mevcut teknoloji ve mevzuattaki gelişmeler, pultrüzyon endüstrisinin gelecekteki durumunu temelden değiştirecek bir eğilimi başlattı. Reçinenin enjekte edildiği ve böylece sertleşmeden hemen önce elyaf takviyelerini emprenye ettiği entegre kapalı banyo tasarımının, açık banyo yönteminin yerini alması öngörülmektedir. Bu değişimlere uyum sağlamak, pultrüzyonun rekabet gücünü ve daha geniş endüstri uygulamalarını maksimize etmek için önemlidir. Sürekli teknolojik evrim, pultrüzyonun bu değişen peyzajdaki potansiyelini en üst düzeye çıkarmak için hayati önem taşımaktadır. Bu yeni yaklaşım, reçine ile doyurulmuş fiber takviye malzemelerin kalıplama işleminden önce kapalı havuzda kontrol edilen bir sıcaklık ortamında üretilmesini içermektedir. Bu çalışma, kapalı banyo pultrüzyon yönteminin diğer kompozit üretim tekniklerine karşı sağladığı avantajlarını kullanarak sıcaklık kontrollü ortamda profil üretiminin nasıl yapıldığını ve nasıl bir avantaj sağladığını incelemektedir. Kapalı banyo sisteminde ön ısıtılmış reçinenin profil üretiminde sıcaklık kontrolünün rolü ve etkileri özellikle vurgulanmıştır. Reçinenin ön ısıtılması sayesinde kür sıcaklığına ulaşma süresi kısaltılarak kalıp uzunluğu etkin hale getirilmiş ve üretim hızı artırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kapalı banyo pultrüzyon, Fiber takviyeli kompozit, Sıcaklık kontrolü.

TEMPERATURE CONTROL ACROSS THE MOLD TO PRODUCE PROFILES BY CLOSED BATH PULTRUSION METHOD.

Cemil Safa GÜLSEVER

**Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Master Thesis, February 2024
Supervisor: Prof. Yahya GUZEL**

ABSTRACT

Pultrusion is a cost-effective and highly automated technology used for the production of fiber-reinforced composite profiles. A standard open bath pultrusion setup is used to wet fiber reinforcement materials in a tank filled with liquid resin. Advances in current technology and legislation, such as the tightening of workplace regulations for safety and health, the introduction of new resin types to the pultrusion market, and the demand for higher product quality in many sectors, have initiated a trend that will fundamentally change the future state of the pultrusion industry. The integrated closed bath design, in which the resin is injected and thus impregnates the fiber reinforcements immediately before curing, is envisaged to replace the open bath method. Adapting to these changes is important to maximize the competitiveness of pultrusion and its wider industry applications. Continuous technological evolution is vital to maximize pultrusion's potential in this changing landscape. This new approach involves producing resin-saturated fiber reinforcement materials in a controlled temperature environment in a closed pool before molding. This study examines how profile production is carried out in a temperature-controlled environment by using the advantages of the closed bath pultrusion method over other composite production techniques and what advantage it provides. The role and effects of temperature control in profile production of preheated resin in the closed bath system are particularly emphasized. Thanks to pre-heating of the resin, the time to reach the curing temperature was shortened, the mold length was made effective and the production speed was increased.

Keywords: Closed bath pultrusion, Fiber reinforced composite, Temperature control.

İÇİNDEKİLER

KAPALI BANYO PULTRÜZYON YÖNTEMİYLE PROFİL ÜRETMEK İÇİN KALIP BOYUNCA SICAKLIK KONTROLÜ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY	iv
TEŞEKKÜR	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
KISALTMALAR.....	x
SEMBOLLER	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

PULTRÜZYON YÖNTEMİ

1.1. Standart Pultrüzyon Yöntemi.....	3
1.2. Kapalı Banyo Pultrüzyon Yöntemi.....	7
1.2.1. Kapalı Banyo Pultrüzyon Yönteminde Kalıp Tasarımı	10
1.2.2. Kapalı Banyo Pultrüzyon Yönteminde Takviye (Fiber) Hazırlığı ..	13
1.2.2.1. Takviye Karakterizasyonu	15
1.2.2.1.1. Sıkıştırılabilirlik	16
1.2.2.1.2. Geçirgenlik	17
1.2.3. Kapalı Banyo Pultrüzyon Yönteminde Reçine Hazırlığı.....	17
1.2.3.1. Reçine Reaksiyon Kinetiği	21

1.2.3.1.1. Poliesterleşme Reaksiyon Kinetiği	23
1.2.4. Kapalı Banyo Pultrüzyon Yönteminde Sıcaklık Kontrolü	26

2. BÖLÜM

MATERYAL VE METOT

2.1. Kalıp Tasarımı	29
2.2. Takviye Hazırlığı	34
2.1. Reçine Hazırlığı	37
2.2. Kalıp Boyunca Sıcaklık Kontrolü	41

4. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç ve Öneriler	46
KAYNAKÇA.....	49
ÖZGEÇMİŞ	53

KISALTMALAR

CFM	: Sürekli Filament Keçe
CTP	: Cam Takviyeli Plastik
DEA	: dietilen anilin
DMA	: dimetil anilin
FRP	: Fiber Takviyeli Plastik
IA	: İzofthalik anhidrit
İSG	: İş Sağlığı ve Güvenliği
LCD	: Sıvı Kristal Ekran
LCM	: Likit Kompozit Kalıplama
MA	: Maleik anhidrit
MPD	: 1,3 propan diol
PA	: Ftalik anhidrit
PVC	: Vinil Klörür
RTM	: Reçine Transfer Kalıplama
TTT	: Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm

SEMBOLLER

$^{\circ}\text{C}$	: Celcius
A	: Arrhenius denkleminin pre-eksponansiyel faktörü
Cm	: santimetre
Ea	: Aktivasyon Enerjisi
g	: gram
kg	: kilogram
L	: litre
mA	: miliamper
Mm	: milimetre
Pw	: Basınç Eşiği
R	: Gaz sabiti
T	: Sıcaklık
Tcure	: Kurlenme sıcaklığı
Tg	: Isıl geçiş sıcaklığı
V	: volt
W	: watt
α	: kurlenme derecesi

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.2.2.1. Cam elyaf türleri ve özellikleri	14
Tablo 1.2.3.1. Polimer malzemelerin maksimum çalışma sıcaklıkları.....	18
Tablo 1.2.3.1.1. Farklı çalışmalarda kullanılan modellerin listesi (Model – Denklem – Kullanılan Reçine Sistemi)	22



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.1. Kompozit üretim tekniklerinin karşılaştırılması.....	4
Şekil 1.1.2. Standart Pultrüzyon yönteminin şematik gösterimi... ..	5
Şekil 1.2.1.1. (a) Koppernaes ve (b) Gauchel patentlerine göre reçine enjeksiyon hazneli kalıp tasarımları (Pw: Basınç eşiği).....	11
Şekil 1.2.1.2 Tasarlanmış emprenye odası.....	12
Şekil 1.2.3.1. Uyarlanmış TTT diyagramı.....	21
Şekil 1.2.3.1.1. Vinil ester reaksiyonu.....	24
Şekil 1.2.3.1.2. Maleik anhidrit, ftalik anhidrit ve izoftalik anhidrit reaksiyonu	25
Şekil 2.1.1. Rezistans kalıpları.....	30
Şekil 2.1.2. Kalıbın monte edilmiş hali.....	31
Şekil 2.1.3. Kalıbın havuz bölümü.....	32
Şekil 2.1.4. Kalıbın üst-alt tabakalarının (solda üst, sağda alt) 2. ve 3. Parçaları	33
Şekil 2.1.5. Kalıp içerisindeki kılavuz profil.....	33
Şekil 2.2.1. (A) Mat şeklinde E tipi cam elyaf. (B) Bobin şeklinde E tipi cam elyaf	34
Şekil 2.2.2. Çalışmada kullanılan FWR ₆ cam elyaf.....	35
Şekil 2.2.3. Elyafların kalıp için hazırlanması.....	36
Şekil 2.2.4. Elyafların kalıbın havuz bölümündeki deliklerden geçişi... ..	37
Şekil 2.3.1. Çinko stearatın olası yapısı.....	38
Şekil 2.3.2. İzofthalik asit ve mono etilen glikol ile üretilen izofthalik poliestere	39
Şekil 2.3.3. Çalışmada kullanılan izofthalik stirenli reçine.....	39
Şekil 2.3.4. Çalışmada katalizör olarak kullanılan kobalt naftanat (solda) ve radikal oluşturuıcı olarak kullanılan peroksit (sağda)	40
Şekil 2.4.1. Kalıplar için girilen sıcaklık değerleri (alt kısım) ve Termokupl sıcaklık değerleri (üst kısım).....	43
Şekil 2.4.2. Kalıplara bağlanan Termokupllar.....	43
Şekil 2.4.3. Çekme işlemini sağlayacak sistem.....	44
Şekil 2.4.4. Çekme işlemini sağlayan sisteminin kontrol panosu. Üstte büyük olan motorların hızını belirleyen kontrol ekranı, alttaki küçük ekran ile sıcaklık kontrolünün yapıldığı ekran.....	45
Şekil 2.4.5. Çekme makinesine bağlanan sıcaklık kontrol cihazında girilen değerler...	46

Şekil 3.1.1. Kapalı banyo pultrüzyon yöntemiyle elde edilen ürün.....	48
Şekil 3.1.2. Elde edilen ürünün çekme sistemiyle çekilmesi	48



GİRİŞ

Pultrüzyon, fiber takviyeli kompozit profillerin üretimi için yaygın olarak kullanılan bir çekme işlemi teknolojisidir. Bu yöntemde özellikle doymamış polyester reçineleri ve cam elyaf fitilleri gibi birçok dolgu malzemeleri içerir. Bu süreç, diğer birçok kompozit üretim yöntemiyle karşılaştırıldığında düşük yatırım ve üretim maliyetleriyle birlikte nispeten yüksek otomasyon düzeyine sahiptir. Genellikle düşük maliyetli hammadde kullanımı ile yaygın olarak kullanılmaktadır.

Pultrüzyon, basit bir üretim tekniği olarak değerlendirilse de aslında bir dizi fiziksel sürecin eş zamanlı olarak gerçekleştiği karmaşık bir yöntemdir. Bu süreçler arasında malzeme ve kalıp arasında ısı transferi, reçine sertleştirme (kürleme) reaksiyonu (malzeme durumundaki değişiklikler ve ekzotermik reaksiyon ısının serbest bırakılması ile) ve termal olarak genleşme ve sıkışma yüzünden indüklenen malzemede iç gerilmelerin ve deformasyonun gelişimi bulunmaktadır.

Kapalı banyo pultrüzyon tekniğinde, kullanılan fitillerin reçineyle düzgün bir şekilde ıslanması için kritik emdirme adımı kapalı bir kalıp sisteminde yapılır. Sıvı reçinenin takviye yığını içine emdirilmesi ve kılavuz kesitten geçerken sıkma ile boşlukları doldurduğu, sınırlı bir boşluk hacmine kaydığı ve reaksiyon sürecinin kalıp sonuna doğru tamamlanması için belirli sıcaklık kontrolü ile öne çıkar. Pultrüzyon sürecinde sıcaklık kontrolü, ürünlerin kalitesini belirleyen kritik bir faktördür. Homojen bir sıcaklık dağılımı, malzemenin istenilen sertliğe ve mukavemete ulaşmasını sağlar. Son dönemdeki kapalı banyo pultrüzyon teknikleriyle ilgili gelişmeler, standart açık banyo yöntemiyle elde edilen kompozit profiller ile aynı kalitede ürünler elde etme odaklıdır [1]. Ancak, bu gelişmelerle birlikte, meydana gelen fiziksel olayların ve etkileşimlerinin temel anlayışına yönelik çabalar yeterli düzeyde değildir. Bu bağlamda, sürekli iyileştirme ve kapalı banyo pultrüzyon tekniğinin yeni bir endüstri standardı haline gelmesi için temel bilgiye olan ihtiyaç önemlidir. Bu tezde, pultrüzyon ve kullanılan

pultrüzyon yöntemleri hakkında gerekli bilgiler toplanıp ve ayrıca karşılaştırma yapılarak kapalı banyo pultrüzyon yönteminde sıcaklık kontrolünün önemine yer verilecektir. Daha sonra yapılan deneysel uygulamanın materyalleri ve metotları başlıklar halinde anlatılacaktır.



1. BÖLÜM

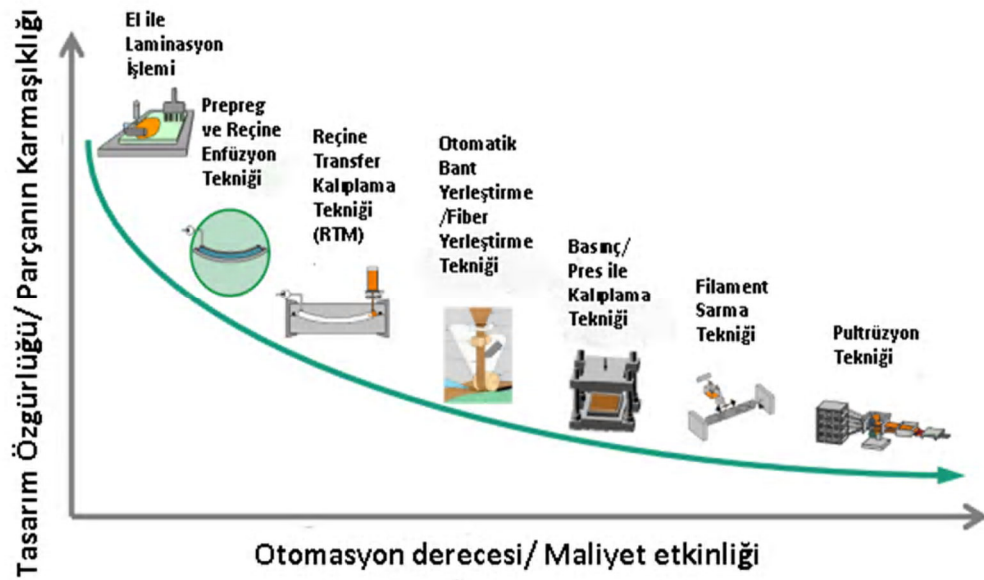
PULTRÜZYON YÖNTEMİ

1.1. Standart Pultrüzyon Yöntemi

Pultrüzyon yöntemi, cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan bir teknolojidir. İngilizce “pull” (çekmek) ve “extrusion” (ekstrüzyon) kelimelerinin birleşiminden oluşur. Pultrüzyon, uzun fiber takviyeli malzemelerin polimer reçine içinde emprenye edilmesi, kılavuz kesit alanında şekillendirilmesi ve belirli bir kalıpta reçinenin ‘kür’ olarak sertleşmesi sürecidir [1]. Bu süreç, endüstriyel uygulamalarda kullanılan yapısal elemanlar, boru hatları, merdiven korkulukları ve elektrik izolatörleri gibi birçok ürünün üretimini mümkün kılar. Şu anda, pultrüzyon yöntemi kullanılarak, S-camı, karbon ve kevlar gibi güçlü takviye malzemeleri ile epoksi, fenolik ve termoplastik matris malzemeleri kombin edilerek üretim gerçekleştirilebilmektedir. Bu gelişmeler, pultrüzyonun sahip olduğu avantajlar sayesinde, havacılık, taşımacılık, spor malzemeleri ve tıbbi donanım gibi çeşitli sektörlerde kullanım alanı bulmasına imkân tanımaktadır. Bu yöntemin geniş bir malzeme yelpazesi kullanma esnekliği, yüksek mukavemet ve hafiflik gibi avantajları mümkün kılmaktadır. Çeşitli endüstriyel alanlarda pultrüzyonun etkili bir şekilde kullanılabilmesi, malzeme çeşitliliğinin ve üretim esnekliğinin bir sonucudur[2].

Pultrüzyon, bir malzemenin belirli bir kalıpta şekillendirilip sertleştirilmesini içerir, bu da yüksek mukavemet göstermesi, dayanıklı olması ve sürekli üretim gibi avantajları beraberinde getirir [3]. Mukavemete önemli katkı sağlayan şey ise malzeme içindeki fiberlerin (Cam elyaf en çok kullanılan malzemelerden biridir.) matris ile homojen bir şekilde birleştirilmesinin sağlanmasıdır. Pultrüzyonun gerçekleşmesi pek çok parametreye bağlı olabilir. Örnek olarak, hazırlanan kalıbın iyi bir mühendislik ile tasarlanması gerekebilir veya cam elyafların kalitesinin iyi düzeyde olması gerekmektedir. Reçinedeki monomerlerin oranlarından başlayıp, katalizör ve başlatıcı

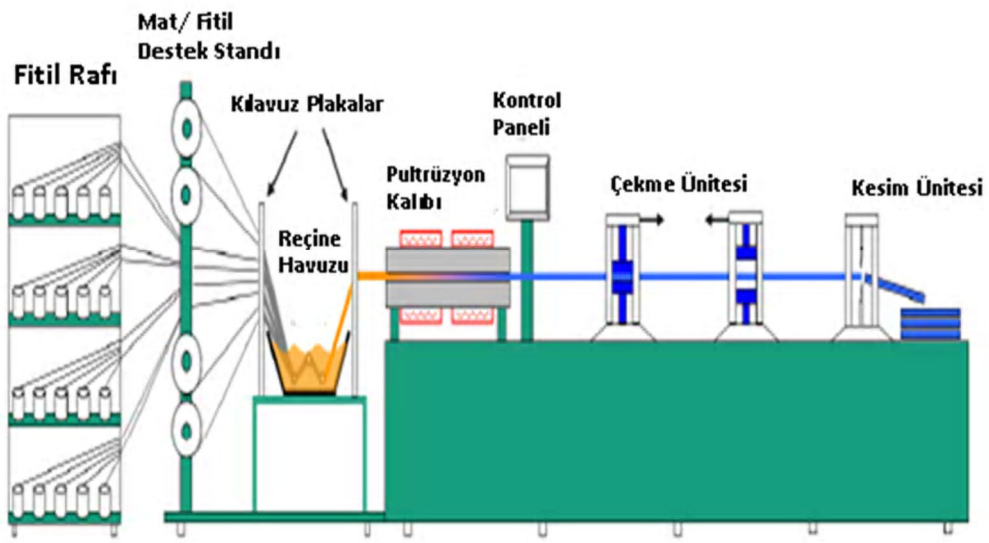
miktarları ile beraber reaksiyon sıcaklığına kadar pek çok şey ortaya çıkan ürünün kalitesini belirleyebilir. Bu özellikleri sayesinde diğer birçok kompozit işleme yöntemiyle karşılaştırıldığında pultrüzyon, en fazla mukavemet sağlayan yöntemlerden biri olarak kabul edilir. Ayrıca üretim merkezinin yaygın olması sayesinde her bölgede tüketiciye ulaşmak mümkün olduğundan pultrüzyon ürünlerinin geniş bir kullanım alanına sahip olma şansı oldukça yüksektir. Pultrüzyon, genellikle ekonomik hammaddelerin (çoğunlukla doymamış polyester reçineleri, cam elyaf fitilleri ve diğer takviyeler) birlikte kullanıldığı bir süreçtir. Bu avantaj, muhtemel parça çeşitliliğini azaltarak ve sınırlayarak dengelenir. Sürekli fiber takviyeli plastiklerin (fiber reinforced plastic FRP) üretimi için mevcut farklı üretim tekniklerinin bir karşılaştırması Şekil 1.1.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1.1. Kompozit üretim tekniklerinin karşılaştırılması [4].

Bu yöntemin dezavantajı, genellikle sabit kesitli profiller gibi basit geometrilerin üretimine sınırlıdır. Pultrüzyonla üretilen ürünler, özellikle korozyon direnci ve dielektrik özelliklerin avantajlı olduğu inşaat ve altyapı gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Ancak, hafif tasarım alanındaki potansiyel uygulamalar henüz tam olarak keşfedilmemiştir. Örnek olarak, taşımacılık, sağlık ve otomotiv endüstrileri verilebilir [4].

Pultrüzyon işlemi, sabit kesitli profillerin üretilmesine imkân tanıyan bir işlemdir. Açık reçine ıslatma tankına ait; fitil askılarından, sürekli filament keçe (CFM) katmanlarının veya herhangi bir tekstil bantlarının konumlandırıldığı raflardan, bir reçine tankından, delikli plakalardan ve diğer kılavuz parçalardan oluşan bir ön şekillendirme tertibatından, ısıtılmış bir kalıptan, bir çekme cihazından ve uçan bir kesme testeresinden oluşan örnek bir üretim hattı Şekil 1.1.2' de gösterilmektedir.



Şekil 1.1.2. Standart Pultrüzyon yönteminin şematik gösterimi [4]

Endüstride yaygın olarak kullanılan Şekil 1.1.2.' de gösterilen yöntem "Açık Banyo Pultrüzyon Yöntemi" olarak adlandırılan yöntemdir. Açık banyo pultrüzyon, işleminde özel bir açık tank veya banyo içinde gerçekleştirilerek, uzun ve düz profillerin üretimini optimize eder. Bu yöntemde, lifler atmosfere açık içinde sıvı reçine ile doldurulmuş bir tanka yönlendirilir. Daha sonra sıvı reçine ile homojen bir şekilde ıslanan fiberler sıcaklık kontrollü bir kalıptan geçirilerek reaksiyona sokulur. Bir çekme ünitesi yardımıyla ürün çekilir ve kesilir.

Açık banyo pultrüzyon yönteminde, açık reçine tankının kullanılması, bazı reçine bileşenlerinin uçucu ve toksik olması nedeniyle reçinelerin hazırlanması sırasında çeşitli kimyasal maddeler salınabilir. Açık tanklarda bu maddelerin atmosfere yayılma riski vardır [4]. Bu durum çevresel sorunlara ve sağlık sorunlarına yol açabilir. Bu durum, çalışma alanında dikkate alınması gereken önemli bir konudur. Ayrıca kimyasal

maddelerin kullanılması ve manipölasyonu, güvenlik endişelerini artırabilir. Açık tanklarda çalışırken, işçilerin uygun kişisel koruyucu ekipmanları kullanmaları önemlidir. İlgili güvenlik standartlarına ve prosedürlere uyulmaması durumunda, bu kimyasal emisyonlar ciddi sağlık riskleri oluşturabilir [5]. Fakat her ne kadar böyle bir dezavantajı olsa da, açık tank kullanılması malzemenin homojenliğini artıran bir özellik sunduğu gibi oluşacak herhangi bir soruna da müdahale edebilme imkânı sunabilir. Fiberglas takviyeleri ve polimer reçine karışımı, açık banyo içinde düzenli bir şekilde dağılarak ürünün istenen özelliklere sahip olmasını sağlar. Bu homojenlik, ürünlerin mükemmel mekanik özelliklere sahip olmasını sağlayarak, endüstriyel uygulamalarda yüksek performanslı sonuçlar elde etmeye katkı sağlar [5].

Uluslararası İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) kurumları tarafından düzenlemelerin sıklaştırılması, yeni reçinelerin, özellikle kısa kap ömrüne sahip olan poliüretan ve poliester reçineler gibi, pultrüzyon pazarına sunulması ve çeşitli sektörlerdeki yeni uygulamaların gereklilikleri, pultrüzyon endüstrisinde önemli değişikliklere yol açmaktadır. Bu yeni yaklaşım, özellikle açık banyo emprenye yönteminin yerini alacak ve daha etkili sonuçlar elde etmeyi amaçlayan yeni yaklaşımların geliştirilmesine yönlendirmektedir [4].

Geleneksel açık banyo emprenye yönteminin yerine geçmesi beklenen yeni bir yaklaşım, kapalı banyo içine sıvı reçinenin enjekte edildiği ve bu sayede takviye elyaflarını ıslatan bütünleşmiş boşluklara sahip pultrüzyon kalıplarının kullanıldığı bir sistemdir. Ayrıca, bu yeni yaklaşım, sıvı reçinenin enjekte edildiği bir odanın yukarıdan aşağıya doğru akışın olduğu ve her tarafta aynı dağılımın bulunduğu bu şekilde standart kalıpların entegre edilmesi gibi alternatif uygulamaları da içermektedir.

Bu değişikliklerin ana nedenlerinden biri, İş Sağlığı Güvenliği (İSG) kurumlarının artan düzenleme ve güvenlik standartlarıdır. Yeni reçinelerin kullanımı, özellikle pultrüzyon endüstrisindeki güvenlik standartlarını karşılamak ve işçi sağlığını korumak adına önemli bir adım olarak görülmektedir. Aynı zamanda, bu yeniliklerin özellikle birçok sektörde yeni uygulama alanlarına daha uygun hale gelmesi beklenmektedir. Bu değişim sürecinde, pultrüzyon endüstrisindeki geleneksel uygulama yöntemlerini revize ederek, daha etkili, güvenli ve çevre dostu bir üretim sürecine doğru bir adımı temsil

etmektedir. Bu değişim, sektördeki rekabeti artırarak, ürün kalitesini iyileştirme ve taleplere daha hızlı yanıt verme kapasitesini artırma potansiyeli taşımaktadır [4].

Bu tip kalıbın tasarımı, özellikle enjeksiyon ve emprenye boşluğu içeren kısımlarıyla, standart bir kalıbın tasarımından daha karmaşık bir süreçtir. Temel nedeni, elyaf yığınlarının, emprenye boşluğu uzunluğu boyunca sıkıştırılırken reçine ile iyice emprenye edilmesinin bu durumda gerekliliğidir. Bu tasarım zorluğu, özellikle elyaf yığınının kalıbın son kesitine kadar olan kısa emprenye boşluğu uzunluğu boyunca homojen bir şekilde emprenye edilmesini sağlamak amacıyla ortaya çıkar.

Yıllar içinde, bu tür tasarımlarla ilgili birçok patent ve yayın ortaya çıkmıştır ve geliştirme genellikle deneme yanılma yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Ancak, endüstri tarafından uygulanan tasarımlar genellikle şirket içi teknik bilgi olarak kabul edildiğinden, detayları tam olarak kamuya açıklanmamaktadır [4].

Bu süreçteki karmaşıklık, emdirmeye boşluğu uzunluğu boyunca elyaf yığınlarının homojen bir emprenye edilmesini sağlamak adına yapılan tasarım çabalarının karmaşıklığını vurgular. Bu çabaların genellikle patent ve bilimsel literatürde açıklanması, endüstrinin bu alandaki teknik gelişmeleri paylaşma konusundaki geleneksel tutumlarına dayanmaktadır. Bu çalışmanın sonraki bölümlerinde kapalı banyo pultrüzyon yöntemi, kullanılan kalıp, matriksler (reçine), takviye ürünler (cam elyaf, karbon elyaf) ve sıcaklık kontrolü gibi konular detaylı bir şekilde işlenmiştir.

1.2. Kapalı Banyo Pultrüzyon Yöntemi

Kapalı banyo pultrüzyon yöntemine ait işlemlerin adımları aşağıdaki gibidir:

- **Takviye Hazırlığı:** Pultrüzyon süreci, genellikle cam elyafının kullanıldığı bir takviye malzemesi ile başlar. Bobinler halindeki bu elyaflar, belirli bir düzen içinde yerleştirilir ve genellikle yerleşme düzenindeki sıralama elyafların birbiri ile dolaşmayacağı şekilde emprenye girişine yansıtılır ve kalıp girişinden sonra mat haline getirilir.
- **Matris Malzemesi Hazırlığı:** Matris malzemesi, genellikle polyester, vinil ester veya epoksi reçineleri gibi polimer tabanlı malzemelerdir. Bu malzeme, sıvı formda hazırlanır ve takviye malzemesinin içine kapalı ıslatma kalıbında emprenye edilerek homojen bir karışım elde edilir. Kapalı ıslatma kalıbı içinde

40-45 °C sıcaklıklarda emprenye olma gücü artırılabilir. Ayrıca bu sıcaklık reçinenin sonraki kalıp içinde kür olması için iyi bir hazırlık sağlar.

- **Pultrüzyon Makinesi ve Kalıp:** Hazırlanan takviye ve matris karışımı, özel bir pultrüzyon makinesine beslenir. Bu makine, karışımı şekillendirilen bir kalıp içine çekilir. Kalıp içinde, takviye ve reçineden oluşan matris istenen profil veya borunun şeklini alır.
- **Kürleme ve Çekme:** Enjekte edilen malzeme kalıpta kürleşir ve istenen sertlik ve dayanıklılığı elde etmek için belirli bir süre boyunca çekilir.
- **Kesim ve İşleme:** Kürleşen malzeme, istenilen uzunlukta kesilir ve gerekirse diğer işlemler uygulanarak son ürün elde edilir.

Takviye malzemesini kapalı bir ıslatma tankında emprenye yapmak için, sıvı reçine kürleme işlemi başlamadan önce takviye malzemesi çekildiği ve ıslatıldığı kısıtlı bir hacimli kalıp içinde ısıtılır. Temelde, kalıptan çıkan profil, açık banyolu profil ile aynı olabilir; ancak, ıslatma süreci ısıtmaktan dolayı önemli ölçüde farklıdır [4]. Kapalı banyo pultrüzyon durumunda, reçinenin bir şekilde sıkıştırılmış takviye yığını içinden akması gerektiğinden, ıslatma süreci daha zorlu hale gelmesi gerekirken ön ısıtma sayesinde bu zorluk aşılır. Islaklık kalitesinin, genel olarak kalıp tasarımına ve özellikle enjeksiyon ve emprenye odası adı verilen tasarımın özel detaylarına bağlı olarak değişmesi beklenir. Kapalı tekniklerin avantajları arasında, kısa kap ömrüne sahip reçinelerin işlenebilmesi ve çalışma ortamındaki zararlı uçucu reçine bileşenlerinin azaltılması bulunmaktadır [4]. Kapalı banyo pultrüzyon yönteminin avantajlarını maddeler halinde özetlenecek olursa:

- **Reçine Kontrolü:** Kapalı banyo pultrüzyon yöntemi, reçinenin sıkıştırılmış takviye yığını içinden akması nedeniyle reçine kontrolünü artırır. Bu, üretilen malzemenin homojen yapısını ve istenilen mukavemet özelliklerini artırabilir.
- **Daha Yüksek Islatma Kalitesi:** Sıvı reçinenin kapalı banyo içine doğrudan enjekte edilmesi, takviye malzemesinin daha etkili bir şekilde ıslatılmasını sağlar. Bu, malzemenin daha homojen ve istenen özelliklere sahip olmasına olanak tanır.
- **Zararlı Uçucu Reçine Bileşenlerinin Azaltılması:** Kapalı banyo pultrüzyon, çalışma ortamındaki zararlı uçucu reçine bileşenlerini azaltabilir. Bu da iş sağlığı ve güvenliği açısından avantaj sağlar.

- **Kısa Kap Ömrüne Sahip Reçinelerin İşlenmesi:** Kapalı banyo pultrüzyon yöntemi, kısa kap ömrüne sahip reçinelerin daha etkili bir şekilde işlenmesine olanak tanır. Bu, üretim süreçlerinde daha fazla esneklik sağlar.
- **Daha Yüksek Ürün Kalitesi:** Reçine ve takviye malzemesi kontrolünün artması, kapalı banyo pultrüzyonun genellikle daha yüksek ürün kalitesine sahip olmasını sağlar. Homojen malzeme yapısı, ürünün mukavemet ve dayanıklılık açısından daha güçlü olmasına katkı sağlar.
- **Daha Etkin Kalıp Performansı** Reçine ve takviye malzemesinin kapalı banyo içinde ön ısıtılması, matrisin kolay emrenye olmasını sağladığı gibi kalıp uzunluğunda da performansı artırır ve daha etkili yapar.

Bu avantajlar, kapalı banyo pultrüzyonun endüstriyel uygulamalarda tercih edilmesini sağlayan faktörlerdir. Pultrüzyonun temel amacı, malzeme içindeki fiberlerin matriks ile homojen bir şekilde birleştirilmesini sağlamak ve sonucunda ürünlerin yüksek dayanıklılığa, hafifliğe, korozyon direncine ve elektrik izolasyon özelliklerine sahip olmasını sağlamaktır [6]. Bu noktada, kapalı banyo pultrüzyon, genel pultrüzyon sürecinin özel bir türüdür ve endüstriyel uygulamalarda daha karmaşık ve yüksek kaliteli ürünlerin üretilmesine yönelik özel bir çözümdür ve belirtildiği üzere pek çok avantaj sağlamaktadır.

Dış etkenlerin sınırlanması, ürünün kalite kontrolü üzerinde olumlu bir etki yapar. Havanın ve nemin ürünle temasını minimumda tutarak daha tutarlı sonuçlar elde edilir [7]. Kapalı banyo pultrüzyonunun sağladığı bu kontrollü süreç, fiber takviyeli malzemenin matrikse daha homojen bir şekilde yerleştirilmesine hizmet eder. Bu da ürünlerin yüksek dayanıklılık ve mukavemete sahip olmasına vesile olur [8][9]. Ayrıca kapalı banyo pultrüzyon yöntemi, çeşitli endüstriyel sektörlerde ihtiyaç duyulan özel tasarımlara uygun ürünlerin üretimine olanak tanır [10].

1.2.1. Kapalı Banyo Pultrüzyon Yönteminde Kalıp Tasarımı

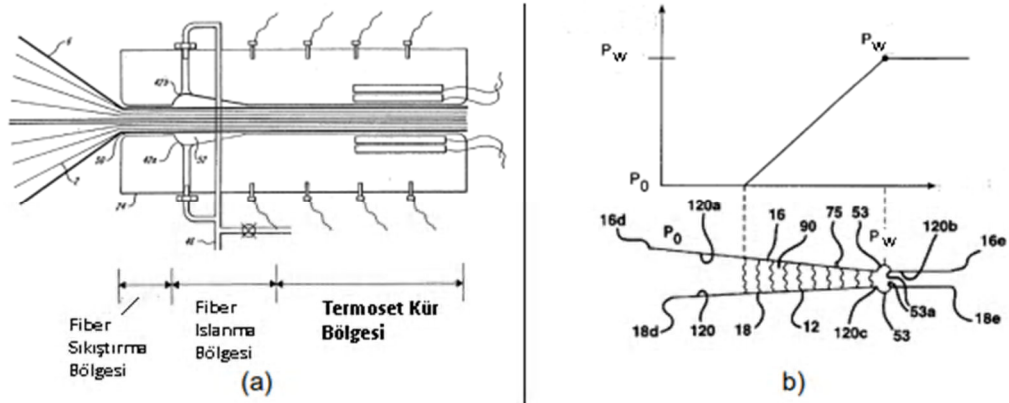
Kapalı banyo pultrüzyon kalıp tasarımı, ürünün iç ve dış detaylarını belirlemek açısından önemlidir. İç yüzey detayları, ürünün yüzey kalitesini etkiler ve genellikle dokular veya desenler içerir. Kalıp, ürünün son kesit formunu alacak şekilde tasarlanmalı ve dış yüzeyde istenen estetik ve fonksiyonel özelliklere uygun olmalıdır. Kalıp tasarımı aynı zamanda ürünün boyutları, kalınlığı ve uzunluğu gibi fiziksel

özellikleri belirleyerek ürünün istenen mekanik özelliklere ulaşmasını sağlar. Kalıp, genellikle metalden yapılır ve özellikle demir çelik veya alüminyum kullanılabilir. Alüminyum, hafif ve dayanıklı olması nedeniyle ve demir çelik mukavemetli ve uzun ömürlü olması nedeniyle tercih edilen bir malzemedir. Ayrıca, kalıp malzemesinin ısıyı iyi ileten bir özelliğe sahip olması, pultrüzyon sırasında reçinenin hızlı bir şekilde sertleşmesine yardımcı olur. Kapalı banyo pultrüzyon kalıpları, genellikle iki parçadan oluşur ve ürünün çıkarılabilmesi için kalıp açıklıkları veya kapıları bulunur. Bu açıklıklar, pultrüzyon işlemi tamamlandıktan sonra kalıptan çıkan ürünü çıkarmayı kolaylaştırır veya kalıp içinde reçinenin erken kür olmasıyla istenmeyen katılaşmaya karşı temizlik işlemleri için fırsat verir.

Pultrüzyon işleminde, hali hazırda kullanılan 2 bileşenli poliüretan reçinelerle çalışan şirketler, reçinenin düşük kap ömrü nedeniyle genellikle kapalı banyo yöntemini benimsemek zorunda kalmaktadır. Bu durum, mekansal olarak sınırlı bir süreç anlamına gelir. Öte yandan, bazı şirketler, geleneksel polyester ve vinil ester reçinelerine dayanan standart profiller üretmek için kapalı enjeksiyon kalıplarını kullanmaktadır. Bu şirketler, geleneksel reçine türlerini tercih ederek, kapalı enjeksiyon kalıpları aracılığıyla daha geleneksel pultrüzyon yöntemini benimsemektedir [11].

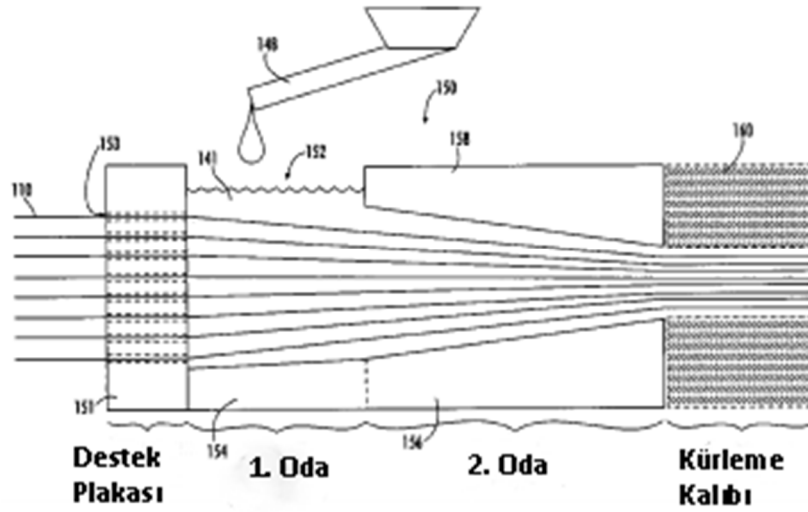
Bu tür kalıpların tasarım detayları, teknik literatürde genellikle kolaylıkla bulunmamaktadır. Ancak, bazı patentler, özellikle enjeksiyon odalarının tasarımını detaylandırmışlardır [12]-[13]. "Gözyaşı damlası" geometrisi olarak adlandırılan konik daraltıcı bir boşluğu tanımlayan, kalıp uzunluğu boyunca tekrar tekrar uygulanabilen bir geometri önerdi. Bu tasarım, ıslanma sırasında gazın daha etkili bir şekilde giderilmesine imkân tanıyan seri halinde birden fazla hazne içermektedir.

Öte yandan, Gauchel, konik bir daralma boşluğunun patentini almıştır ve bu tasarımda reçine, kalıp uzunluğu boyunca elyaf yığınının zaten sıkıştırılmış durumda olduğu bir pozisyonda enjekte edilir. Bu tasarım, işleme uygunluğunu, konik bölgenin küçük bir açısı ($<1^\circ$) ile sağlamaktadır. Argümanları, fitillerin boylamasına ve enine yönlerdeki göreceli geçirgenliklere dayanmaktadır. Her iki patent tasarımının şematik çizimleri Şekil 1.2.1.1' de sunulmaktadır.



Şekil 1.2.1.1. (a) Koppernaes [12] ve (b) Gauchel [13] patentlerine göre reçine enjeksiyon hazneli kalıp tasarımları (Pw: Basınç eşiği)

Başka bir patent çalışmasında [14], açık banyo ile kapalı oda arasında bir "melez" teknik olarak adlandırılabilen bir yöntemi tanımlamışlardır. Bu yöntemde, kullanılan fiberler, iki hazneden oluşan emprenye ünitesine beslenir. İlk oda, reçinenin fitiller arasından aktığı bir banyo gibidir, fitiller bu bölgede eşit olarak dağıtılır. Çekme dağıtımı, destek plakasındaki delik düzeni ile belirlenir. Reçinenin doluluk seviyesi sürekli olarak ölçülür veya odanın tepesindeki atmosfere açılan bir açıklıktan dökülür. Sıvı seviyesi, tüm yedek parçaların sıvıya batmasını sağlayacak kadar yüksek tutulur. İkinci oda, fitillerde homojen ıslanmayı sağlayan konik kesit alanına sahiptir. Araştırmacılar, birinci haznede akışın Darcy'nin gözenekli ortamdan akış kanunu tarafından yönlendirildiğini, ikinci haznede ise kılcal akışın önem kazandığını ve hatta baskın ıslatma mekanizması haline geldiğini ileri sürmektedir (Şekil 1.2.1.2.' de gösterilmektedir.).



Şekil 1.2.1.2 Tasarlanmış emprenye odası [14].

Kalıplar, birleşik bir tasarım olarak oluşabilir; yani enjeksiyon ve emprenye bölgeleri aynı takım çeliğinden işlenebilir veya mekanik olarak birbirine geçebilen farklı kalıp parçaları olarak tasarlanabilir. Bu tasarımların kendine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Entegre tasarımda yani birbirine mekanik olarak geçebilen tasarımlarda, reçinenin birikme potansiyeli artar ve kapatılması gereken herhangi bir bağlantı yüzeyinin olmamasına sebep olabilir fakat ayrı kalıp parçaları, soğuk emdirme bölgesi ile sıcak sertleştirme kısmı arasında daha etkili bir ısı yalıtımına imkân tanımaktadır. Tek bir takım çeliğinden yapılmış kalıp düzeninin avantajı ise teorik olarak standart pultrüzyon kalıplarının kapalı enjeksiyon işlemine uyarlanabilmesidir. Bir çalışmada [15], çubuk üretimi için dikey olarak monte edilmiş bir profil pultrüzyon kalıbının örneğini tanımlamışlardır. Kalıbın üst kısmında, elyafların beslendiği ve reçinenin dişli pompalarla ölçüldüğü kısa, konik bir bölüm bulunmaktadır. Bu konik veya konik kalıp girişine dayalı başka sunumlarda benzer bir yöntem önerilmiştir [16][17]. Son birkaç çalışmada, iki farklı kalıp giriş geometrisi olan Koppernaes' in gözyaşı damlası odası ve Gauchel' in konik geometrisi için elde edilen sonuçları sunmuşlardır (Koppernaes ve Gauchel için bkz. Şekil 1.2.1.1.) [18].

1.2.2. Kapalı Banyo Pultrüzyon Yönteminde Takviye (Fiber) Hazırlığı

Çekilmiş profiller, genellikle uzunlamasına yerleştirilen elyaf fitilleri ile Şekil 1.2.1.2.'deki gibi güçlendirilir. Bu fitiller genellikle cam ve karbon olup, aramid ve bazalt gibi özel uygulamalarda da kullanılabilir. Endüstride kullanılan fiberleri maddeler özetleyecek olursak:

- **Cam Elyafı (Glass Fiber):**

- Cam elyafı, silikat mineralini temel alan bir malzemedir.
- Üretim süreci genellikle erimiş camın ince liflere çekilmesini içerir.
- Hafif, dayanıklı ve korozyona karşı dirençlidir.
- Pultrüzyon, laminasyon ve kalıplama gibi süreçlerde kullanılır.

- **Karbon Elyafı (Carbon Fiber):**

- Karbon fiber, karbon atomlarının uzun zincirler oluşturacak şekilde düzenlenmesiyle elde edilir.
- Hafif, yüksek mukavemetli ve sert bir malzemedir.
- Otomotiv, havacılık, uzay endüstrisi ve spor ekipmanları gibi birçok alanda kullanılır.

- **Aramid Elyafı (Aramid Fiber):**

- Aramid fiberleri, aromatik poliamidlerden türetilmiştir.
- Kevlar ve Nomex gibi ticari markalar bu kategoriye girer.
- Yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve direnç gibi özelliklere sahiptir.
- Balistik kalkanlar, kasklar, uçak lastikleri gibi alanlarda kullanılır.

- **Doğal Elyaf (Natural Fiber):**

- Doğal fiberler, bitkilerden, hayvanlardan veya mineral kaynaklardan elde edilen liflerdir.
- Örnekler arasında pamuk, keten, kenevir ve jüt gibi bitkisel fiberler bulunur.
- Daha sık olarak giyim, ambalaj ve hafif yapılar gibi alanlarda kullanılır.

Cam elyafı, genellikle E-Cam tipi olarak bilinen bir tür (cam elyaf türleri ve fiziksel özellikleri Tablo 1.2.2.1.' de gösterilmiştir.), profilakme endüstrisinde yaygın olarak kullanılan en popüler takviye türüdür, çünkü doğrudan fitil olarak kullanılabilir, ekonomik olma eğilimindedir ve elektrik yalıtım özelliklerine sahiptir. Yüksek mukavemet ve hafiflik gerektiren ürünlerde, özellikle otomotiv parçalarında, karbon fiber fitilleri veya kırıklar tercih edilir. Pultrüzyonla üretilen otomotiv parçalarının

tasarım kısıtlamalarına rağmen, sürecin maliyet etkinliği ve otomasyon potansiyeli, bu pazarı çekici kılmaktadır ve gelecekte tasarım anlayışlarında değişikliklere yol açabilir [4].

Tablo 1.2.2.1. Cam elyaf türleri ve özellikleri [16].

Elyaf Tipleri/Özellik	E	ECR	Advantex®	C	A	S-2®	R	Cemfil (21)	AR1	AR2	D
Sıvılaşma sıcaklığı (°C)	1140	–	–	–	1010	–	–	1201	1172	–	–
Elyaflaşma sıcaklığı (°C)	1200	–	1250	–	1280	–	–	1470	1290	–	–
25°C'de tek elyaf çekme mukavemeti (GPa)	3.7	3.4	3.8	3.4	3.1	4.7	4.5	2.9	3.24	2.5	2.4
Tek elyaf çekme modülü (GPa)	76.0	73.0	–	–	72.0	86.0	85.0	–	73.0	80	52
Yoğunluk (g/cm ³)	2.53	2.6	2.62	2.49	2.46	2.48	2.55	–	2.74	2.74	2.1
Kırılma indeksi	1.550	1.58	1.56	–	1.541	1.523	–	–	1.526	1.561	1.465

Kompozit parçanın mekanik performansını belirleyen önemli faktörlerden biri, fiber ile matris arasındaki bağdır. Bu bağ, fiber filamanların yüzeyine eşit bir şekilde yayılan, matrisle uyumlu bir ıslatıcı malzemenin uygulanması ile sağlanır. Genellikle cam elyafında silan bazlı ıslatma ve karbon elyafında epoksi veya poliüretan bazlı ıslatmalar gibi standart ıslatma türleri, pultrüzyon gibi işlemlerde tipik reçine sistemlerine etkin bir bağlanma oluşturur.

Başarılı bir pultrüzyon üretimi için işlenebilirlik önemlidir ve genel olarak cam elyaflarının işlenmesi, karbon elyaflarına kıyasla daha kolaydır. Karbon fiber filamanlar, kırılğan doğası nedeniyle fiber demetinden kolayca ayrılabilir ve işleme hatlarında birikebilir. Bu sebeple, cam elyafların işlenmesinde kullanılan ön

şekillendirme düzeneklerindeki kılavuz elemanlar genellikle düşük maliyetli malzemelerden yapılabilir (örnek olarak polietilen verilebilir).

1.2.2.1. Takviye Karakterizasyonu

Pultrüzyon işlemi, takviyelerin bir reçine matrisine entegre edilmesiyle kompozit malzemelerin üretimini sağlayan özel bir üretim süreci olduğu için takviyeler, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini belirleyen kritik bileşenlerdir. Bu nedenle, pultrüzyon işleminde kullanılan takviyelerin karakterizasyonu, malzemenin performansını anlamak ve geliştirmek için önemli bir adımdır. Pultrüzyon işleminde kullanılan takviyelerin karakterizasyonu, bir dizi özellik ve parametrenin değerlendirilmesini içerir. Bu özellikler arasında takviye malzemesinin tipi, oranı, yönlendirilmesi, mekanik özellikleri, kimyasal dayanıklılığı ve termal davranışı bulunmaktadır. Takviye oranı ve yönlendirilmesi, malzemenin mekanik özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynar. Yüksek takviye oranı, genellikle malzemenin dayanıklılığını artırır, ancak bu oranın aşırı olması işlenebilirliği olumsuz etkileyebilir. Takviye malzemesinin doğru yönlendirilmesi, malzemenin istenilen mukavemet ve rijitlik özelliklerine ulaşmasına yardımcı olur [19]. Mekanik özellikler, pultrüzyon işleminde kullanılan takviyelerin karakterizasyonunda önemli bir odak noktasıdır. Çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, kopma uzaması ve rijitlik gibi parametreler, malzemenin dayanıklılığı ve performansını belirler [20].

Pultrüzyon işlemi, profilin yatay yönde hizalanan fitil katmanlarından ve düzlemsel takviyelerden oluşan çok katmanlı bir laminat yapının kullanılmasıyla karakterizedir. Bu laminat yapının bir sonucu olarak, fitillerin tam olarak konumlandırılması önemlidir [4]. Katman boyunca eşit bir fiber dağılımı elde etmek, yani reçine açısından zengin bölgelerden ve çok yüksek fiber hacmi içeriğine sahip diğer bölgelerden kaçınmak için konumlandırma genellikle fitillerin, üretilen profil kesitine özel delik desenlerine sahip kılavuz plakalardan geçirilmesi yoluyla gerçekleştirilir [4]. RTM (Reçine Transfer Kalıplama) işleminde düzlemsel takviyeler, genellikle kalıplanan parçanın şekline göre kesilir ve reçine kapatılıp enjekte edilmeden önce kalıba yerleştirilir. Bu takviyeler sıklıkla birbirine bağlanır; form stabilitesi elde etmek için toz bağlayıcılar veya iplikler kullanılabilir [4]. Öte yandan, pultrüzyon işlemi, profilin uzunlamasına yönde hizalanan fitil katmanlarından ve düzlemsel takviyelerden oluşan çok katmanlı bir laminat yapının kullanılmasıyla karakterizedir. Bu laminat yapının bir sonucu olarak, fitillerin tam

olarak konumlandırılması önemlidir. Katman boyunca eşit bir fiber dağılımı elde etmek, yani reçine açısından zengin bölgelerden ve çok yüksek fiber hacmi içeriğine sahip diğer bölgelerden kaçınmak için konumlandırma genellikle fitillerin, üretilen profil kesitine özel delik desenlerine sahip kılavuz plakalardan geçirilmesi yoluyla gerçekleştirilir [4].

1.2.2.1.1. Sıkıştırılabilirlik

Fiber takviyelerin sıkıştırılabilirliği, özellikle farklı takviye malzemelerinin katmanlarından oluşan bir parça tasarımında önemlidir. Pultrüzyon prosesi için, sıkıştırma basıncına ve tanımlanan düzlemsel takviyelerin sayısına göre belirli bir kesiti doldurmak için gereken fitil sayısını tahmin etmek için her fiber takviyesinin sıkıştırılabilirliği bilinmelidir.

Yapılan bir çalışmada [21], farklı takviyelerin tek bir yerleştirmede kombinasyonunun genellikle bireysel katmanların hacim oranlarından tahmin edilenden daha yüksek bir hacim oranına yol açtığını belirtmiştir. Bu durum, iç içe geçme etkisi olarak adlandırılan katmanların birbirleriyle iç içe geçmesinden kaynaklanır. Fitil katmanını sıkıştırmak için gereken kuvveti, fitil demetlerini bir borudan çekerek, gerekli çekme kuvvetini ölçerek ve belirli bir sürtünme katsayısı varsayarak dolaylı olarak değerlendirmişlerdir.

Pratik amaçlar için genellikle en önemli değişken çekme direncine karşılık minimum çekme kuvvetidir. Reçine ile ıslatılmış elyaf yığınının sıkıştırılmasından kaynaklanan direnç artışı, boşluğun azaltılması ve malzemenin sıcaklıkla genleşmesinden ortaya çıkar. Sıkışmaktan dolayı hava, reçineden daha kolay geri akış yoluyla kalıp girişinden çıkabilir. Çekme kuvveti üzerindeki sürtünme direncinin katkısı, pultrüzyon işlemini izleme için tartışmasız en önemli deneysel değişkendir [4].

1.2.2.1.2. Geçirgenlik

Reçine için fiber takviyelerin geçirgenliği, sıvı akış simülasyonları ve kompozit üretim süreçlerinin daha iyi anlaşılması için kritik bir malzeme parametresidir. Bu özellik, likit kompozit kalıplama (LCM) işlemleri ve reçine transfer kalıplama (RTM) gibi üretim süreçlerinde kullanılan takviye malzemelerinin karakterizasyonu için yaygın olarak

kullanılan bir tekniktir. Geçirgenliğin belirlenmesi, malzemenin düzlemsel veya enine yönelimine bağlı olarak çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir [4].

Düzlem içi geçirgenlik için kullanılan deneysel teknikler, doğrusal ve radyal akışa ayrılabilir. Her iki tekniğin kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Geçirgenlik, doymamış veya doymuş akıştan elde edilebilir. Doymamış akışta, donatı içine sıvı enjekte edilirken akışın ön konumu ve zamana karşı kayıt yapılır. Doymuş durumda ise, sıvı sürekli olarak zaten ıslanmış takviyenin içinden akar ve geçirgenlik farklı konumlardaki mutlak basınçlardan ve hacimsel akış hızından belirlenir. Doğrusal akış ölçümünden elde edilen verilerin regresyonu için basit bir analitik çözüm mevcuttur [4]. Radyal akış yöntemi için ise, akış cephesinin ana eksenlerinde farklı zamanlarda doğrudan gözlemlenmesinden veya akış cephesinin akış bölgesinde belirli noktalara ulaştığı zamanlardan geçirgenlik parametrelerini belirlemek için analitik çözümler üzerine birtakım çalışmalar bulunmaktadır [22][23].

1.2.3. Kapalı Banyo Pultrüzyon Yönteminde Reçine Hazırlığı

Pultrüzyon işleminde kullanılan reçineler genellikle poliester, vinilester ve epoksi türlerini içerir. İşte bu üç reçine türünün kısa bir açıklamasını yapacak olursak:

- **Poliester Reçineler:**

- Pultrüzyonda yaygın olarak kullanılan bir reçine türüdür.
- Ekonomik ve geniş bir kullanım alanına sahiptir.
- Mekanik özellikleri genellikle orta düzeydedir.
- Dayanıklısıdır ancak yüksek sıcaklık veya kimyasal direnç açısından sınırlamaları vardır.

- **Vinilester Reçineler:**

- Poliester reçinelerin geliştirilmiş bir versiyonudur.
- Daha iyi kimyasal dirence ve sıcaklık dayanımına sahiptir.
- Mekanik özellikleri genellikle daha yüksektir.
- Denizcilik uygulamaları gibi özel endüstrilerde tercih edilir.

- **Epoksi Reçineler:**

- Mekanik özellikleri yüksek olan bir reçine türüdür.
- Yüksek mukavemet, düşük kırılma ve üstün yapışma özelliklerine sahiptir.

- Kimyasal direnci iyidir ve genellikle özel uygulamalarda, özellikle havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılır.
- Pultrüzyon işleminde kullanımı daha teknik ve maliyetlidir.

Bu reçineler, pultrüzyon işleminin özelliklerini ve kullanım alanlarını belirlemede önemli bir rol oynar. Seçim, özellikle malzemenin dayanıklılığı, mukavemeti, kimyasal direnci ve uygulama alanları göz önüne alındığında, spesifik projeye bağlı olarak yapılır.

Fiber takviyeli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan matris malzemesi genellikle polimerlerdir. Bu sektörde, özellikle cam lifi takviyeli polimer matrisli malzemelere "cam takviyeli plastikler" veya kısaca "CTP" adı verilir.

Termoplastikler ve termosetler, polimer malzemelerin sınıflandırılmasında temel iki kategori oluşturan iki ana grup polimer tipidir.

Tablo 1.2.3.1. Polimer malzemelerin maksimum çalışma sıcaklıkları

MALZEME TİPİ	MAKSİMUM ÇALIŞMA SICAKLIĞI (°C)
TERMOSETLER	
Vinilester	60-150
Polyester	60-150
Fenolik	70-150
Epoksi	80-215
TERMOPLASTİKLER	
Polietilen	50-80
Polipropilen	50-75
Polyester	70-120
Asetat	70-95

İki grup arasındaki temel fark, ısıya tepki şekilleri ve geri dönülebilirlik özellikleridir. Termoplastikler, ısıtıldığında yumuşar ve soğuduktan sonra tekrar katılaşabilir. Termosetler ise bir kere sertleştikten sonra bu durum geri dönülemez ve ısı veya basınç altında erimezler. Her iki tip polimer de endüstriyel ve tüketici uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Fakat endüstride en çok kullanılan termoset poliester reçinelerdir.

Termoplastikler, düz veya dallı zincir yapılarına sahip maddelerdir ve genellikle (ikinci dereceden) Van der Waals bağları ile bir araya gelmişlerdir. Bu malzemelerin, zayıf bir yapıya sahip olması ve yanal bağların zayıflığı sebebiyle sertleşme ve yumuşama gerçekleşebilmektedir. Sıcaklık etkisine bağlı olarak gerçekleşen bu yumuşama ve sertleşme özelliği, malzemenin yapısının buharlaşma olmadığı sürece devam eder [17].

Termoplastik malzemeler, oda sıcaklığında yüksek viskoziteye sahip oldukları için, matris malzemesi olarak kullanıldıklarında matrisle lif fazı arasındaki bağların kurulması termoset malzemelerine göre çok daha zordur. Ayrıca, termoplastiklerin yükselen sıcaklık karşısında yumuşaması nedeniyle, bu malzemelerin kullanım sıcaklık seviyesi de genellikle düşük olmak zorundadır [17].

Termoset poliester reçineler, poliester moleküllerinin ısı ve kimyasal reaksiyonlar sonucunda üç boyutlu ağ polimeri oluşturacak şekilde sertleştiği bir süreçle üretilirler. Dayanıklılık, kimyasal direnç ve mükemmel mekanik özelliklere sahip olmasının üzerinde bu durum yatmaktadır. Bu reçineler, ester grupları içeren poliester moleküler zincirlerinden oluşur. Ester grupları, reçinenin termoset özelliklerini sağlamak üzere sertleşme reaksiyonlarına girer.

Termoset poliester reçinelerin sertleşme süreci genellikle çapraz bağlanma veya polimerizasyon reaksiyonlarına dayanır. Bu reaksiyonlar, reçinenin sıvı halden katı hale geçişini sağlar. Özetlenecek olursa;

- **Termoplastikler:**

- Termoplastik polimerler, yüksek sıcaklıklarda yumuşayıp eriyebilen ve soğuduktan sonra katılaşabilen polimerlerdir.
- Yüksek sıcaklıklarda şekil değiştirebilirler ve bu işlemler tekrarlanabilir.
- Isıtıldığında yumuşayıp eriyen ve soğuduktan sonra tekrar katılaşan bir yapıya sahiptirler.
- Örnekler arasında polietilen, polipropilen, polivinil klorür (PVC) ve polistiren bulunur.

- **Termosetler:**

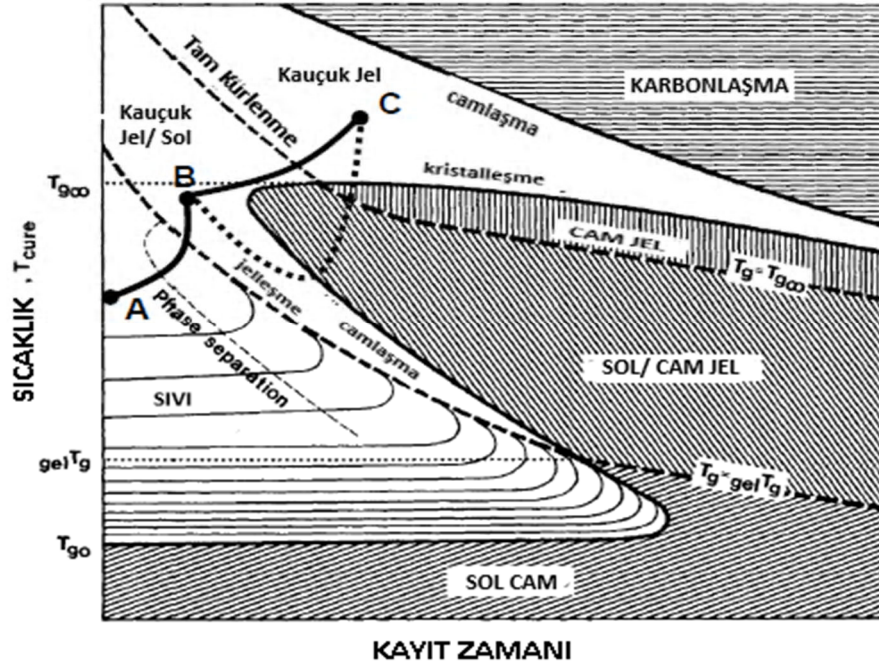
- Termoset polimerler, bir kere sertleştikten sonra ısı veya basınç altında erimeyip tekrar şekil değiştiremeyen polimerlerdir.

- Isıya maruz kaldıklarında kimyasal olarak sertleşirler ve bu sertleşme süreci geri dönülemez.
- Mekanik dayanıklılıkları genellikle termoplastiklere göre daha yüksektir.
- Örnekler arasında epoksi reçineleri, fenolik reçineler ve poliüretanlar bulunur.

Reçine özelliklerinin kürlleme sürecinde değerlendirilmesi ve tahmini, işleme koşullarının belirlenmesi açısından son derece önemlidir. Kemoreoloji, reaksiyon kinetiği ve enerji ile ilişkilendirilerek, termoset reçinelerde kürlleme sırasında meydana gelen fiziksel değişiklikleri inceleyen ve sıvı halden jelleşme yoluyla katı hale (sonsuz üç boyutlu ağ polimeri) geçişini tanımlayan bir terimdir [4].

Başlangıçta polimerleşmemiş veya önceden polimerize edilmiş durumdaki reçine viskozitesi, matris işlem rotası boyunca sertleştikçe, yani sıcaklığın ve zamanın bir fonksiyonu olarak değişir. Reçinedeki sıcaklık, ekzotermik polimerizasyon reaksiyonundan kaynaklanan enerjiden etkilenir. Bu nedenle, bu süreçler arasındaki etkileşim, sürecin daha iyi anlaşılması ve süreç simülasyonu açısından büyük bir öneme sahiptir.

Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (TTT) diyagramı, termosetlerin sertleşme davranışını ve fiziksel özelliklerini anlamak için faydalıdır. Aşağıdaki diyagramda örnek bir çalışmadan alınan TTT diyagramı gösterilmektedir. (Şekil 1.2.3.1.) [18].



Şekil 1.2.3.1. Uyarlanmış TTT diyagramı [18].

Bu çalışmada özellikle ilginç olan şey, malzemenin kürlenme reaksiyonu sırasında geçtiği fiziksel durumları belirlemek için sıcaklık ve zamanın takip ettiği A-, B- ve C-aşamalarıdır. Bu aşamaların teknolojik terimlerdeki sırasıyla sıvı, sol/jel ve jel durumlarıyla olan ilişkisi özellikle dikkat çekicidir. İlk kürlenme adımında, reçine sıvıdan (A aşaması) başlayarak Şekil 1.2.3.1' de A-B çizgisiyle temsil edilen elastik duruma (B aşaması) geçer. Reçine, oda sıcaklığında veya artan sıcaklıkta jelleşmeye uğrar. Bu süreç, reçinenin kürlenme reaksiyonu boyunca geçtiği farklı fiziksel durumları ve bu durumların sıcaklık ve zamanla olan ilişkisini anlamak için önemlidir. Sıcaklığın daha da arttırılmasıyla reçine, tam sertleşme hattını geçerek sıcaklığın cam geçişinin üstünde veya altında olmasına bağlı olarak kauçuk veya cam durumuna ulaşır.

1.2.3.1. Reçine Reaksiyon Kinetiği

Farklı termoset reçinelerin kürlenme derecesinin zamana ve sıcaklığa bağımlılığını tanımlamak için çeşitli ampirik ve mekanistik modeller ortaya konulmuştur. Ampirik modeller genellikle daha basittir; genel bir reaksiyon sırası varsayar ve kürlenme sırasında aynı anda meydana gelebilecek farklı reaksiyon mekanizmaları hakkında detaylı bilgi vermez. Mekanistik modeller ise örneğin FTIR aracılığıyla ölçülebilen reaktanların, ara maddelerin ve ürünlerin konsantrasyonunun karakterizasyonuna gerek

duyar [24][25]. Pultrüzyona uygulanan veya doğrudan pultrüzyon simülasyonlarında kullanılan reçine sistemleri için türetilen ampirik kinetik modellerin çoğu, Kamal-Sourour modeli [26][27] olarak adlandırılan otokatalitik bir modele dayanmaktadır. Kullanılan eşitlikler:

$$d\alpha/dt = (k_1 + k_2\alpha^m)(1-\alpha)^n$$

$$k_i = A_i \exp(-E_i/RT)$$

Yukarıdaki denklemlere göre, k_i 'nin karşılık geldiği ön üstel faktör A_i ve aktivasyon enerjisi E_i ile ilişkilendirildiği Arrhenius terimleri bulunmaktadır. Kinetik verileri elde etmek için en yaygın kullanılan karakterizasyon yöntemi ise Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) olarak bilinmektedir [26]. Farklı çalışmalarda kullanılan modellerin bir listesi Tablo 2.2.3.2. 'de gösterilmiştir.

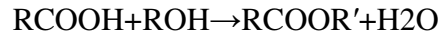
Tablo 1.2.3.1.1. Farklı çalışmalarda kullanılan modellerin listesi (Model – Denklem – Kullanılan Reçine Sistemi) [28][29][30][31].

Birinci Derece	$da/dt = k(1 - \alpha)$	EP
Otokatalitik	$da/dt = (k_1 + k_2\alpha^m)(1 - \alpha)^n$	UP, EP
Kamal-Sourour		UP
		VE
Otokatalitik + Birinci Derece	$da/dt = (k_1 + k_2\alpha)(1 - \alpha)(B - \alpha), \alpha \leq 0,3$ $da/dt = k_3(1 - \alpha), \alpha > 0,3$	EP

1.2.3.1.1. Poliesterleşme Reaksiyonu ve Reaksiyon Kinetiği

Poliesterleşme reaksiyonu, lif takviyeli polimer kompozit malzemelerin üretiminde temel bir aşama olarak öne çıkmaktadır. Bu reaksiyon, poliester reçinelerin oluşturulması için karboksilik asitlerin ve alkol türevlerinin birleşimini içerir. Poliester

reçineler, genellikle termoset polimerler sınıfına aittir ve özellikle pultrüzyon sürecinde yaygın olarak kullanılırlar. Poliesterleşme reaksiyonu genellikle bir karboksilik asit (RCOOH) ve bir alkol (ROH) arasındaki esterleşme reaksiyonudur. Temel kinetik model, reaksiyon hızının reaktanların konsantrasyonlarına ve sıcaklığa bağlı olduğunu gösterir. Genellikle, reaksiyonun birinci dereceden olduğu kabul edilir, yani reaksiyon hızı reaktanların konsantrasyonlarının birinci kuvvetine bağlıdır. Temel esterleşme reaksiyonu şu şekildedir:



Poliesterleşme reaksiyonu kinetiği, esterleşme reaksiyonunun zaman içinde nasıl ilerlediğini ve reaksiyonun hızının hangi faktörlere bağlı olduğunu anlamaya yönelik bir alanı kapsar. Bu kinetik bilgiler, poliester reçinelerin üretim süreçlerini optimize etmek ve istenilen özelliklere sahip malzemeler elde etmek için önemlidir. Bu süreç, malzemenin son özelliklerini belirleyen kritik bir aşama olduğu için sürecin optimize edilmesi, malzemenin performansını artırmak için önemlidir [32].

Reaksiyon genellikle bir asit katalizörü ile hızlandırılır. Kinetik modellemeler, reaksiyonun ilerlemesiyle birlikte reaktan konsantrasyonlarının nasıl değiştiğini ve bu değişikliklerin reaksiyon hızına nasıl etki ettiğini analiz eder.

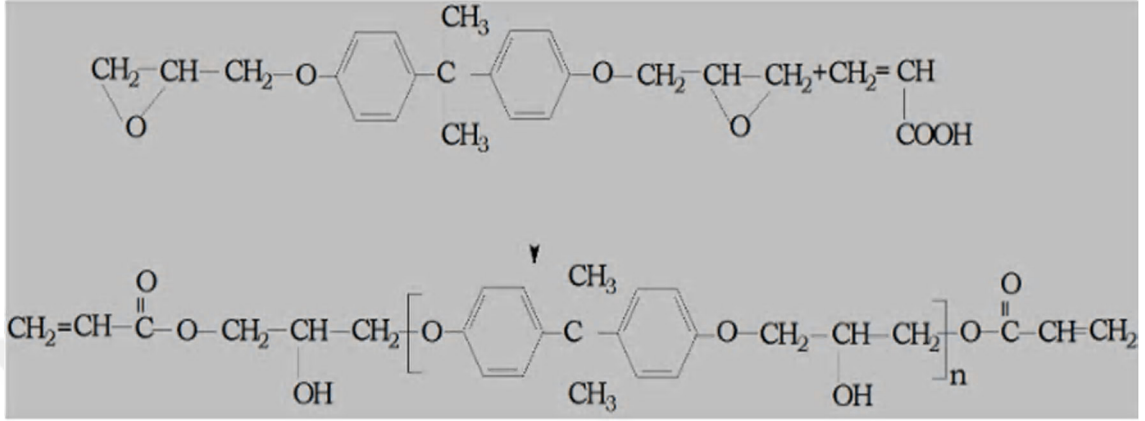
Reaksiyonun kinetiği, genellikle Arrhenius denklemi ile ifade edilir:

$$k = A \cdot e^{-E_a/RT}$$

Burada, k reaksiyon hızını, A pre-eksponansiyel faktörü, E_a aktivasyon enerjisini, R gaz sabitini ve T mutlak sıcaklığı temsil eder. Bu denklem, reaksiyonun sıcaklığa bağlı olarak nasıl değiştiğini açıklar. Bu bilgiler aynı zamanda reçinelerin depolanma süreçleri ve raf ömrü gibi konularda da önemlidir. Literatüre bakıldığında pultrüzyon yöntemi için en çok vinil ester reçineler ve doymamış poliester reçinelerin kullanıldığı gözlemlenmiştir.

Vinil ester reçinelerinin gelişimi, 1950'lerin sonlarına ve 1960'ların başlarına, yani II. Dünya Savaşı'nın hemen sonrasına dayanmaktadır. Geleneksel bir vinil ester reçinesi, çeşitli epoksi reçinelerinin doymamış haldeki mono-karboksilik asitlerle reaksiyonuyla hazırlanabilir [33][34]. Detaylı olarak, glisidil akrilat ve glisidil metakrilatın, bisfenol-A

ile reaksiyona sokulmasıyla hazırlanır. Bu reçineler, oldukça reaktiftir ve kısa ömürlüdür. Vinil esterin genel yapısı, epoksi reçinenin akrilik asitle reaksiyona sokulmasıyla elde edilir [35].



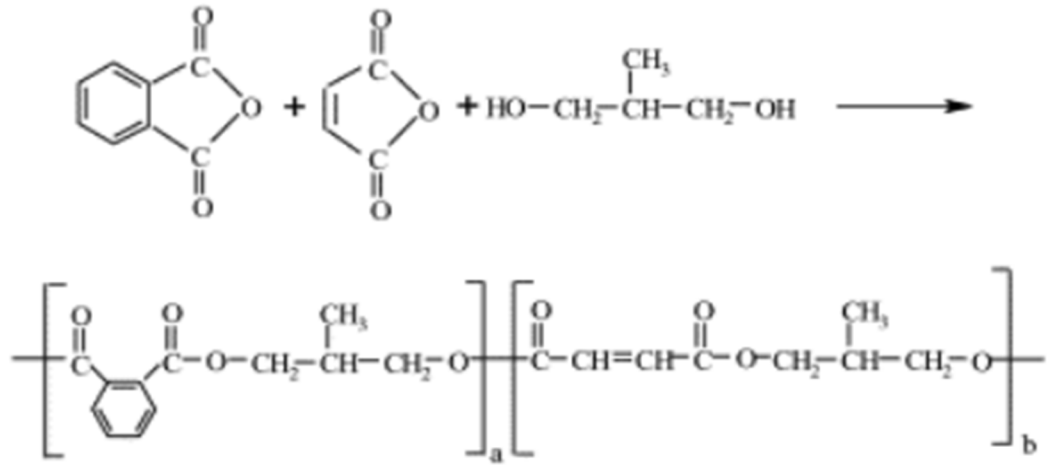
Şekil 1.2.3.1.1. Vinil ester reaksiyonu [35]

Doymamış polyester reçineler, doymamış asitlerin veya anhidritlerin ve diollerin diasitli veya diasitsiz yoğunlaşma ürünleridir. Bu tür polyesterlerde bulunan doymamışlık, sonraki çapraz bağlanma reaksiyonları için bir alan sağlar [36][37]. 1930'lardan bu yana, doymamış polyester reçineler geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmış ve ısıyla sertleşen sistemlerde önemli bir konuma gelmiştir [38][39]. Çeşitli dolgu malzemeleri ve takviyelerle birleştirilen bu reçineler diasitler, dioller, çapraz bağlama maddeleri, başlatıcılar ve diğer katkı maddelerinin seçimine bağlı olarak serbest radikal başlatıcılar kullanılarak kürlenir [40]. Bu çeşitlilik, termoset ürünlerin kimyasal ve mekanik özelliklerini kontrol etmek için geniş bir saha oluşturmaktadır. Ayrıca, termoset ürünlerde, elde edilen reçine, çapraz bağlama için stiren ve az miktarda peroksit gibi bir başlatıcı ile karıştırılmıştır. Bu tür reçineler, tepsiler, duş kabinleri, tekneler, yüzme havuzları, su depoları gibi yapıların yapımında kullanılmaktadır [35].

Bir çalışmada [40], kullanılan prepolimerlerin reaktivitesinin anlaşılması yoluyla doymamış poliester reçinelerin sentezi süreci incelenmiş ve nihai ürünlerin özelliklerini kontrol edip ve optimize etme konusunda önemli bilgiler sağlayan yöntemden bahsedilmiştir. Bu çalışmada kürlenmiş polyester reçinelerin son özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirmek ve özellikle prepolimerlerdeki yardımcı reaktan dizi uzunluğunun etkisini anlamak için poliesterleştirme reaksiyonlarında 1,3-propan-diol (MPD)'ün reaktivitesini incelemektir. Bu amaçla, izotermal koşullar altında farklı

sıcaklıklarda MPD' nin maleik anhidrit (MA), ftalik anhidrit (PA) veya izoftalik asit (IA) ile reaksiyon (Şekil 1.2.3.1.2.' de gösterilmiştir.) hız sabitlerini belirlemek için deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Elde edilen deneysel veriler daha sonra deterministik ve zamana bağlı Monte Carlo yöntemleri kullanılarak simüle edilen kinetik modellerin oluşturulmasında kullanılmıştır. Bu modeller, özellikle yardımcı reaktanların dizi düzenlemelerini öngörmek için faydalıdır. İzomerik reaktanlar olan ftalik ve izoftalik asidin göreceli reaktiviteleri ölçümüne özel bir önem verilmiştir.



Şekil 1.2.3.1.2. Maleik anhidrit, ftalik anhidrit ve izoftalik anhidrit reaksiyonu [40]

1.2.4. Kapalı Banyo Pultrüzyon Yönteminde Sıcaklık Kontrolü

Pultrüzyon yönteminde, sıcaklık kontrolü çok önemli bir işlemdir. Bu süreçte, kontrollü bir ortamda polimer matris ve fiber takviyeleri, önceden tasarlanmış bir kalıp içinde şekillendirilir ve sertleştirilir. Kalıp boyunca sıcaklık kontrolü, pultrüzyonun başarıyla uygulanabilmesi ve ürün kalitesinin optimize edilebilmesi için kritik bir unsurdur. Sıcaklık kontrolünün, pultrüzyonda kritik öneme sahip olmasının nedenleri:

- **Reaksiyon Hızı ve Polimerleşme:** Pultrüzyon sırasında kullanılan polimer matris, genellikle reaksiyona girerken ısı veren ekzotermik bir malzemedir. Bu reaksiyon, polimerin oluşturulması ve malzemenin sağlamlaşması için gereklidir. Sıcaklık, reaksiyon hızını etkileyerek polimerleşmenin düzgün ve

istikrarlı bir şekilde gerçekleşmesini sağlar. Kontrollü sıcaklık, ürün kalitesini artırabilir ve işlemin güvenilirliğini sağlar.

- **Viskozite Kontrolü:** Sıcaklık, kullanılan polimerin viskozitesini etkiler. İdeal viskozite, malzemenin kalıptan rahatça akmasını sağlar ve böylece istenen şekli elde etmek daha kolay olur. Doğru sıcaklık kontrolü, malzemenin viskozitesini optimum düzeyde tutar.
- **Malzeme Dağılımı ve Fiber Yerleşimi:** Sıcaklık, fiber takviyelerin polimer matrise homojen bir şekilde dağılmasını etkiler. Optimum sıcaklık, malzeme içindeki fiberlerin düzenli ve istenilen şekilde yerleştirilmesini sağlar. Bu, son ürünün mekanik özelliklerini artırabilir.
- **Termal Genleşme Kontrolü:** Sıcaklık kontrolü, malzemenin termal genleşmesini yönetmeye yardımcı olur. İdeal sıcaklık koşulları, ürün boyunca homojen bir termal genleşme sağlayarak çatlakların ve deformasyonun önlenmesine katkıda bulunur.

Sonuç olarak, pultrüzyon işlemi sırasında sıcaklık kontrolü, ürün kalitesi, üretkenlik ve enerji verimliliği gibi bir dizi kritik faktörü etkiler. Bu nedenle, doğru sıcaklık parametreleri üzerinde titiz bir kontrol, istenen mekanik özelliklere sahip ve homojen kompozit ürünlerin elde edilmesinde önemlidir.

Sıcaklık kontrolü, çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılan bir dizi makine ve cihaz içerir. Pultrüzyon işleminde de hemen hemen aynı malzemeler kullanılmaktadır. Pultrüzyon işleminde sıcaklık kontrolünü sağlamak için gerekli makinelere ve cihazlara bakılacak olursa özetle:

- **Isıtma Elemanları ve Fırınlar:** Pultrüzyon işleminde kullanılan malzemeleri ısıtmak için fırınlar ve ısıtma elemanları kullanılır. Elektrikli rezistanslar, endüksiyon ısıtıcıları veya gazlı fırınlar gibi çeşitli ısıtma sistemleri kullanılabilir. Bu makineler, malzemelerin istenilen sıcaklığa ulaşmasını sağlar.
- **Kalıp ve Şekillendirme Cihazları:** Isıtılmış malzemeyi şekillendirmek ve kalıplamak için kullanılan kalıp ve şekillendirme cihazları, sıcaklık kontrolünü etkileyen önemli bileşenlerdir. Kalıp malzemesi ve tasarımı, sıcaklık dağılımını ve ürünün nihai özelliklerini etkiler.

- **Sıcaklık Sensörleri ve Kontrol Sistemleri:** Süreç boyunca sıcaklık kontrolünü sağlamak için sıcaklık sensörleri ve otomatik kontrol sistemleri kullanılır. Termokupllar, termistörler veya ısıya duyarlı dirençler gibi sensörler, malzemenin sıcaklığını sürekli olarak izler. Bu veriler, sıcaklık kontrol sistemleri tarafından değerlendirilir ve gerekirse düzeltilir.
- **Soğutma Sistemleri:** İstenilen sıcaklık aralığına ulaşıldıktan sonra, soğutma sistemleri kullanarak malzeme soğutulur. Soğutma, malzemenin sağlamlaşmasını hızlandırabilir ve işlemin daha kontrollü bir şekilde gerçekleşmesine yardımcı olabilir.
- **Hava Akışı ve Nem Kontrolü:** Sıcaklık kontrolünün yanı sıra, pultrüzyon işleminde hava akışı ve nem kontrolü de önemlidir. Bu, malzemenin düzgün kurumasını ve sıcaklık değişimlerine karşı hassas olan süreçlerin etkilenmesini önler.

Bu makineler ve cihazlar, pultrüzyon sürecinde sıcaklık kontrolünü optimize etmek ve istenen kompozit malzeme özelliklerini elde etmek için bir araya getirilir. Tüm bu bilgilere dayanarak sıcaklık kontrolünün pultrüzyon sürecindeki en önemli yeri, poliestерleşme reaksiyonu ve hızı, viskozite kontrolüdür. Çünkü reaksiyonun düzgün bir şekilde başlaması ve tamamlanması için kalıbın belli bir sıcaklığa getirilmesi ve sıcaklığın kalıp boyunca kontrolü son derece önemlidir. Çünkü kürlenme davranışı, Karbon (C) çift bağlarının konsantrasyonuna, stiren ve polyesterin başlangıç molar oranına, katalizör konsantrasyonuna bağlı olduğu gibi, reaksiyon sıcaklığına ve geometrisine bağlıdır [41].

Kullanılan reçine türüne bağlı olarak bir poliestер reaksiyonu ortalama 70-100 °C arasında gerçekleşmektedir [42]. Bu bilgi doğrultusunda pultrüzyon yönteminde, reçineyle ıslanmış takviyelerin kalıp içerisinde sorunsuz bir şekilde ilerlemesi için reaksiyonun kalıp içinde gerçekleşeceği yerin iyi ayarlanıp ve sıcaklığın kontrolü çok önemlidir. Aksi halde kalıpta tıkanmalar ve kopmalar gerçekleşebilir. Her ne kadar sistem doğru çalışsa da, reaksiyon ekzotermik bir reaksiyon olduğu için ve kalıbın sıcaklığını artıracığı için oluşturulan sıcaklık kontrol sistemi de bu duruma göre ayarlanmalıdır.

Kalıp boyunca sıcaklık kontrolünde dikkat edilmesi gereken diğer önemli husus ise çekme hızıdır. Reaksiyon belli bir sıcaklıkta gerçekleşeceği için üretilen malzemenin çekme hızı da sıcaklığa bağlı bir sistemle kontrol edilmesinin gerekebileceği önerilmiştir [43]. Aksi takdirde reaksiyon tam gerçekleşmediği için kopmalar veya tıkanmalar gerçekleşebilmektedir.

Süreci kısaltmak ve reçineyi reaksiyona ideal bir şekilde sokmak için de reçineye bir ön ısıtma işlemi uygulanması da önerilmektedir [43]. Bu sayede reçinenin reaksiyonun gerçekleşme sıcaklığına ulaşma süresi kısılmasıyla çekme işleminin daha hızlı gerçekleşmesini sağlayacaktır. Ayrıca bu sayede reçine viskozitesini kontrol ederek kullanılan takviyelerin ıslatılması ve reçineyi emmesi sağlanmış olur [43].

2. BÖLÜM

MATERYAL VE METOT

2.1. Kalıp Tasarımı

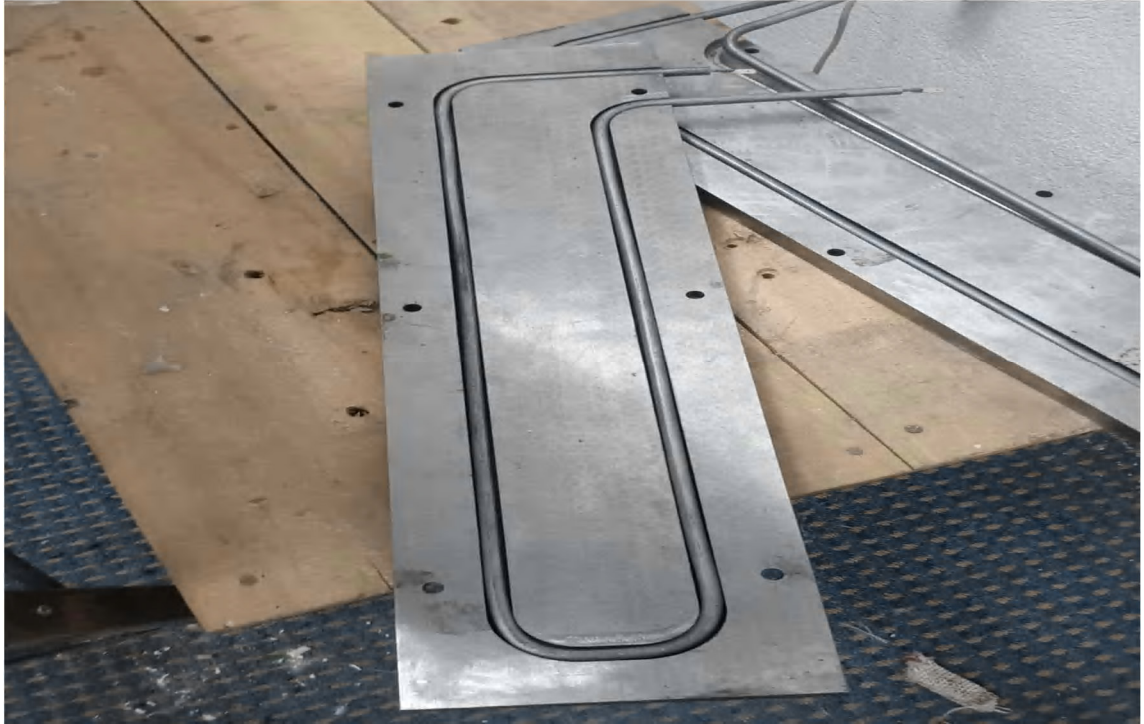
Pultrüzyon yönteminde kalıp tasarımı, üretilecek profilin özelliklerini belirlemede kilit bir role sahiptir. Profil geometrisi, fiber yerleşimi, malzeme seçimi ve kalıp açma-kapanma sistemleri, kalıp tasarımının temel unsurlarını oluşturur. Kaliteli bir kalıp tasarımı, homojen fiber dağılımı ve düzgün takviye yerleşimi sağlamakla kalmaz, aynı zamanda reçine matrisinin etkili bir şekilde profil içine yerleşmesini kolaylaştırarak istenilen mekanik özelliklere ulaşılmasına da katkıda bulunur.

Kalıp tasarımı üretilecek profilin özelliklerine ve profil geometrisine göre değişse de, kalıp tasarımında genellikle alüminyum, çelik, titanyum kullanılmaktadır. Kullanılan her metalin kendine göre üstünlükleri bulunmaktadır. Bir çalışmada [44], P20 (çelik) ve EN8 (karbon-çelik) kalıplar pultrüzyon işlemi için karşılaştırılmıştır. Çıkan nihai ürünlere bakıldığında, P20 kalıp EN8 kalıba göre daha iyi sonuçlar ortaya koymuştur. Tüm bunlara rağmen alüminyum kalıplar hem düşük maliyetli olmaları hem de hafif olması sebebiyle en çok tercih edilen metaldir.

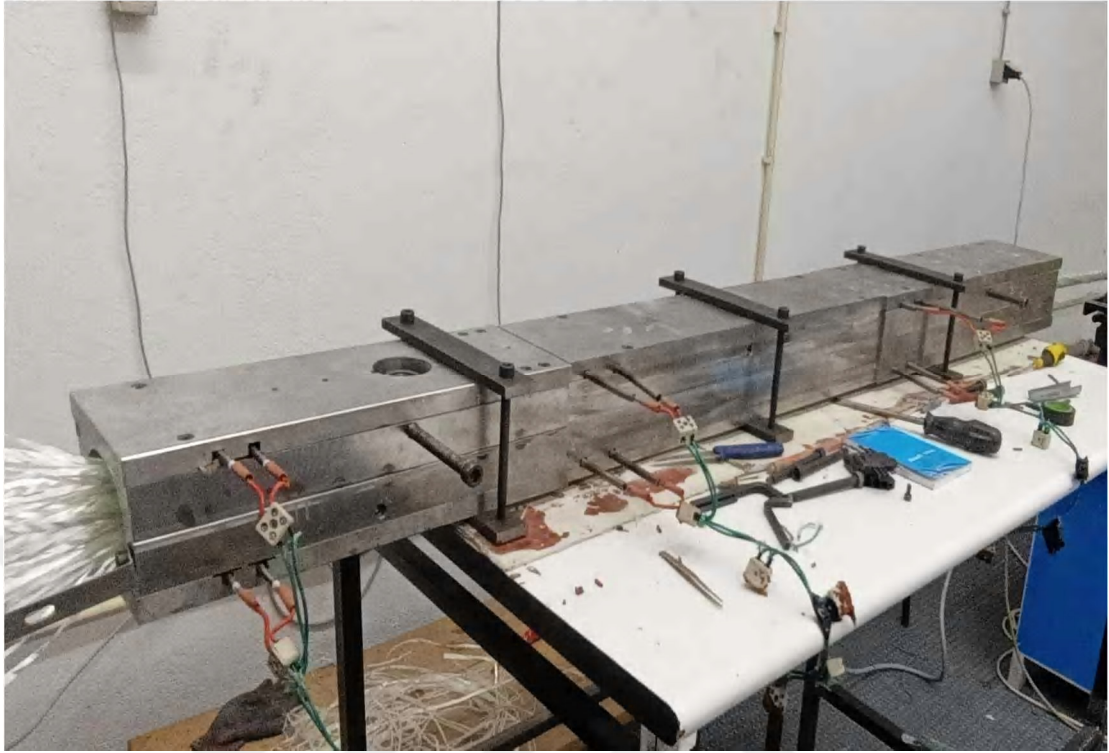
Kapalı banyo pultrüzyon yönteminde en önemli bölüm, kalıbın havuz kısmının tasarımıdır. Kalıbın havuz kısmı, içerisinden geçen fiberlerin reçineyle homojen şekilde ıslanmasını ve reçinenin iyice emdirilmesini sağlayacak şekilde tasarlanması emprenye edilmesi için oldukça önemlidir. Islatma veya emprenye bölümü pultrüzyon işleminde iyi sonuçlar elde etmenin en önde gelen adımıdır. Açık banyolu pultrüzyon yöntemlerindeki gibi açık haznelere ıslatma olmadığı için müdahale şansı çok az olmaktadır. Olası problemlerde müdahale edilebilmesi adına kalıbın havuz bölümüne bir reçine boşaltma deliği açılması önemlidir.

Kapalı banyo pultrüzyon yönteminde, kalıp boyunca sıcaklık kontrolünü sağlamak önemlidir. Diğer bölümlerde de bahsedildiği gibi reçinenin kalıp içerisinde kür reaksiyonu gerçekleşirken belirli bir sıcaklıkta hızla tamamlanır. Çekme sırasında kalıp içerisinde kopmalar ve tıkanmalar yaşanmaması için sıcaklık kontrolünün sağlayabilecek şekilde kalıp tasarımı önemlidir. Reaksiyon ekzotermik olduğu için kalıp içerisinde sıcaklık artışına sebebiyet vereceğinden kalıbın uzunluğu ve genişliği ısı yayılımı için önemlidir.

Bu çalışmada, alt ve üst olarak birbirine geçirmeli, 50 cm' lik havuz bölümü arkasından sırasıyla 60 cm ve 60 cm kılavuz kalıp ve tamamlayıcı olarak 3 parça şeklinde ve birbirine monte edilebilen çelik kalıplar kullanılmıştır. Tüm bu kalıpların üstünü örten ayrı ayrı rezistans kalıpları bulunmaktadır. Bu rezistans kalıpları, rezistanslarla birlikte diğer kalıpların üstüne monte edilerek sıcaklığın kalıp içerisine yayılımına katkı sağlamaktadır. Tek bir kalıp şeklinde yapılmamasının sebebi, sıcaklığın kalıbın diğer bölümlerine etkisini en aza indirmek ve ayrıca olası bir problemde müdahale için kolaylık sağlayabilmektir.

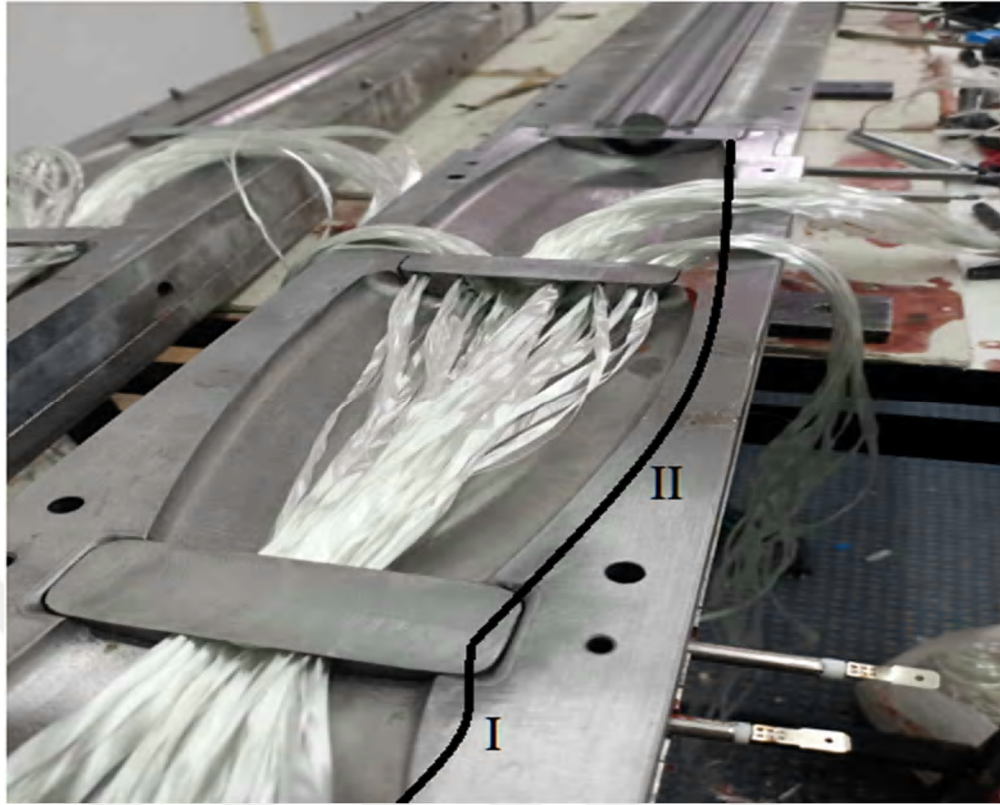


Şekil 2.1.1. Rezistans kalıpları.



Şekil 2.1.2. Kalıbın monte edilmiş hali.

Havuz bölümünün bulunduğu kalıp alt ve üst plaka olacak şekilde 50 cm uzunluğunda ve 16 cm'lik ortak genişlikten oluşmaktadır. 10 cm'lik cam elyaf fitillerinin havuza girdiği kavisli I-bölüme ve reçineyle doldurulacak şekilde boydan boya toplam uzunluk 38 cm ve 11 cm genişlikte II-bölüme sahiptir. Havuzun birinci haznesindeki ıslanan fitillerdeki fazla reçine, yaklaşık orta kısmında 2 cm'lik birbiriyle kavuştuğu bölmede sıkılır ve ardından ikinci haznede tekrar ıslanır. Sıkma işlemi sırasında fitillerin geçeceği 10 adet sağda, 10 adet solda olacak şekilde kalıbın alt ve üst parçasının her ikisine de açılmış 2 cm uzunluğunda delikler ve bu deliklerin arasında ortak toplu bir kanal bulunmaktadır. Bu delikler elyafların reçine ile düzgün bir şekilde ıslanmasını sağlayarak istenilen profilin üretilmesinde kolaylık sağlayacaktır. Havuzun üst kısmında reçinenin havuza kolayca döküleceği yarım parmak çapında geniş bir delik bulunmaktadır. Havuzun alt kısmında ise havuzun içerisinde bulunan reçineni boşaltılmasını sağlayacak bir gider deliği tasarlanmıştır. Bu sayede olabilecek problemlerde reçinenin boşaltılması sağlanarak müdahale şansı sağlanmaktadır ayrıca havuzun temizliği kolaylaşmıştır.

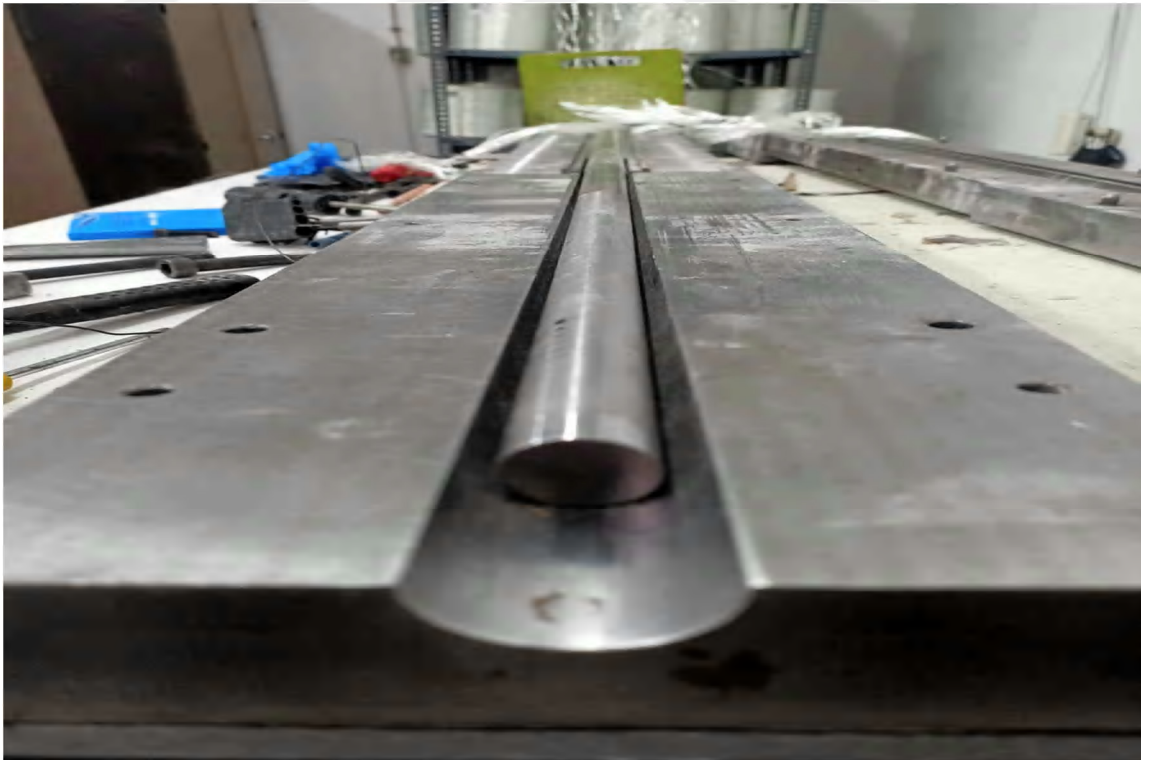


Şekil 2.1.3. Kalıbın havuz bölümü

Kılavuz kalıplar ise üretmek istenilen profilin, profil geometrisine göre değişmektedir. Her biri 60 cm. ve 60 cm. olacak şekilde yine alt ve üst plakalardan oluşan kılavuz kalıplar tasarlanmıştır. 60 cm. uzunluğunda olan kalıp havuz bölümünden sonra gelmekte olup, reçinenin kurlenme reaksiyonunun asıl gerçekleşeceği yerdir. Sıcaklığın diğer bölümlerden daha yüksek olacağı bu bölüm kurlenmenin tam gerçekleşmesi için diğer bölümlerden biraz uzun tutulmuştur. 60 cm olan 3. bölüm ise reaksiyonun tamamlanmaya başladığı ve profilin nihai şeklini aldığı bölümdür. Bu iki bölüm arasında istenilen profilin geometrisine göre tasarlanmış bir metal profil parça bulunmaktadır. Bu parça alt tabakadan ve üst tabakadan gelen fitillerin boru şeklini vereceği bir kılavuz olarak tasarlanmıştır. Bu kılavuz parçası birinci bölüm 60 cm'lik ve ikinci bölüm bir 60 cm'lik oluşmakla 120 cm toplam boya sahiptir. İlk bölümdeki birinci kalıpta reaksiyonun gerçekleştiği ve ikinci kalıpta reaksiyonun tamamlandığı bir sistemdir.



Şekil 2.1.4. Kalıbın üst-alt tabakalarının (solda üst, sağda alt) 2. ve 3. parçaları.



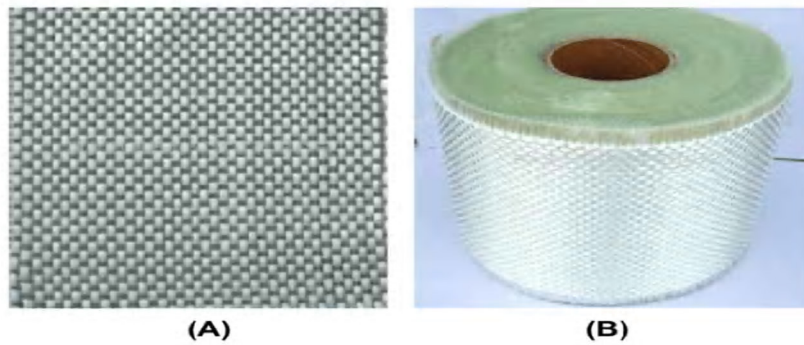
Şekil 2.1.5. Kalıp içerisindeki kılavuz profil

Kalıpların 3 ayrı bölümünde sıcaklığı ve çekme hızını kontrol etmek için termokupl delikleri bulunmaktadır. Bu termokupl delikleri kalıp içerisinde reçinenin geçeceği bölümlere yakın olacak şekilde açılmıştır. Bu sayede kalıp boyunca sıcaklığın kontrolü sağlanmaktadır.

2.2. Takviye Hazırlığı

Pultrüzyon yönteminde takviye (fiber) en çok kullanılan cam elyaf, karbon elyaf ve bazı durumlarda aramid elyaf kullanılmaktadır. Hem maliyet hem de kullanılabilirlik göz önüne alındığında en çok kullanılan ürün cam elyaflardır. Cam elyaf türleri farklı farklı olsa da pultrüzyon yöntemi için en çok kullanılan cam elyaflar E-Glass denilen E tipi cam elyaflardır. Bu cam elyaf türü yüksek mukavemet gösteren ve korozyona karşı dirençli bir elyaf türüdür. Bu elyafın kullanılmasının temel nedenleri için Tablo 2.2.2.1.' e bakılabilir. Ayrıca elyaf seçiminde bir diğer önemli parametre ise reçineyle uyumu olduğu için E-Glass fiberler bu parametre için son derece önemli bir takviyedir.

Elyaf malzemeleri genellikle mat (keçe) veya bobinler halinde gelir. Pultrüzyon işleminde en çok kullanılan bobin halidir. Bu elyaflar, pultrüzyon süreci için uygun bir formda hazırlanmalıdır. Aksi halde pultrüzyon sürecinde kopmalar ve takılmalar gerçekleşebilmektedir. Pultrüzyon işlemi aynı zamanda bir çekme işlemi içerdiğinden takviyelerin kalıp içerisinde hareketinin sorunsuz olması gerekmektedir.



Şekil 2.2.1. (A) Mat şeklinde E tipi cam elyaf. (B) Bobin şeklinde E tipi cam elyaf [45]

E-Glass fiberler de endüstride pek çok farklı çeşitlerde üretilmiştir. Yapılan bu çalışmada, FWR₆ denilen 12 mm.' lik genişliğe sahip tek uçlu E-Glass cam elyaf kullanılmıştır. FWR₆, kolay işlenebilirliği ve özellikle çok düşük pamuklanma

özelliğine sahip olduğu için tercih edilmiştir. Reçineyle düzgün bir şekilde ıslanması çok önemli olduğu için ve bu elyaf lar filament sarma uygulamaları için geliştirilmiş olması ve poliest er, epoksi ve Vinil ester reçinelerle uyumlu olması çalışmada kullanılması için tercih edilmesinin ana nedenlerindendir. Boru üretimi, depolama tankları ve filament sarma uygulamalarında kullanılan bu elyaf türü toplamda 75 adet ve ağırlığı yaklaşık 18,6 kg. gelen bobinler halinde gelmiştir.

Kullanılacak olan elyaf lar, her biri 15 delikli 5 bölmeye ve her bölmeye 15 adet bobin gelecek şekilde dizilmiş ve elyaf ların birbiri üzerine binip takılma olmayacak şekilde tüm elyaf uçları bu deliklerden özenle geçirilmiştir. Aksi takdirde kopmalar gözlemlenebilmektedir. Daha sonra bu elyaf ların kalıp içerisine gireceği sırada herhangi bir takılma veya tıkanma olmaması için bir kılavuz aracılığıyla simetrik olarak ayrılmıştır. Bu kılavuzun amacı, kalıbın havuzunun alt bölümü ve üst bölümünden geçecek elyaf ların hem homojen bir şekilde dağılması hem de sorunsuz bir şekilde kalıba ulaşarak kalıp içerisinde kolayca ilerlemesidir. Ayrıca kalıp içerisinde tüm elyaf ların düzgün bir şekilde ıslanmasına da fayda sağlamaktadır.



Şekil 2.2.2. Çalışmada kullanılan FWR₆ cam elyaf



Şekil 2.2.3. Elyafaların kalıp için hazırlanması

Hazırlanan elyaflar, kalıbın havuz bölmesinin alt ve üst kısmından rahatça geçecek şekilde hazırlanmıştır. Kalıba yapılmış ve elyafların reçine ile homojen bir şekilde ıslanmasını sağlamak için yapılan deliklerden özenle geçirilmiştir. Bu delikler, elyafın düzgün bir şekilde ıslanmasını sağlayacağı için son derece dikkatli olunması önemlidir. Olası bir hatada, elyaflar düzgün bir şekilde ıslanamayacağı için ve ayrıca takılmalar oluşabileceği için çekme işlemi sırasında kopmalar meydana gelebilmekte ve ayrıca reaksiyon homojen bir şekilde gerçekleşemeyeceği için ürünün kalitesiz olması durumu ortaya çıkabilmektedir.



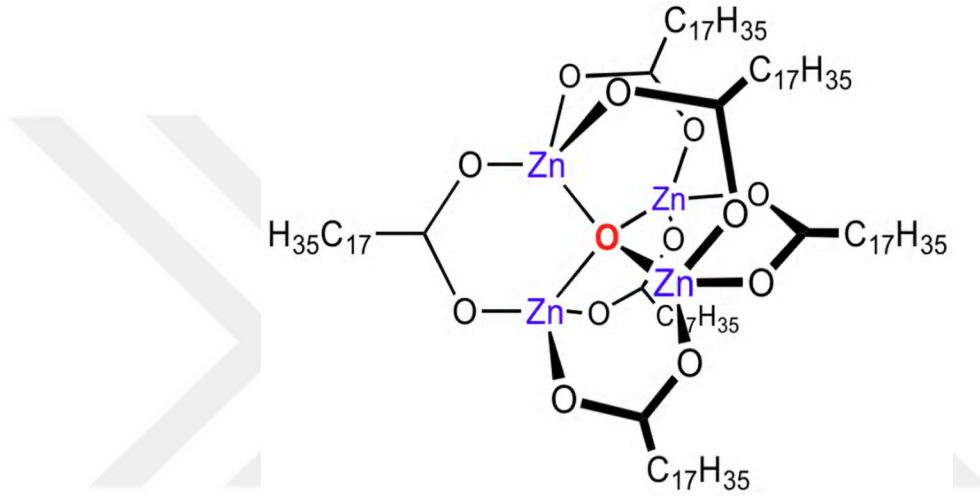
Şekil 2.2.4. Elyafaların kalıbın havuz bölümündeki deliklerden geçişi

Hazırlanan elyafalar kalıbın ortasında bulunan kılavuzun alt ve üst bölümünden düzgün bir şekilde geçirilip çekme işlemini gerçekleştirecek makineye yerleştirilmiştir. Çekme işlemi ile elyafaların hareketi izlenmiş ve problem gözlenmemiştir.

2.3. Reçine Hazırlığı

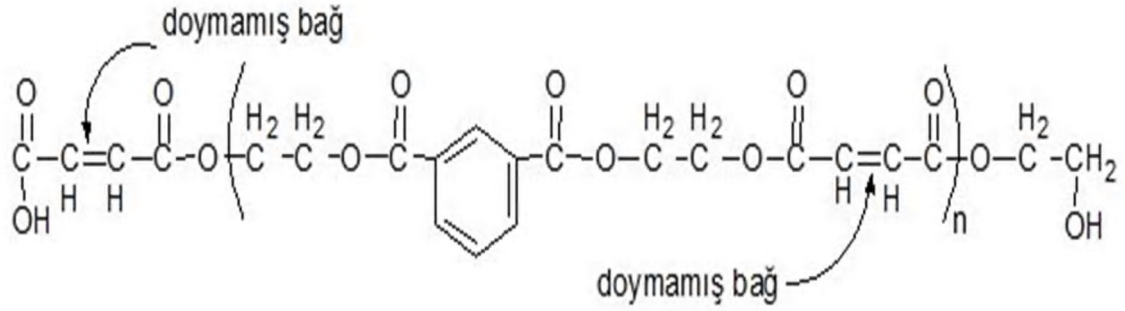
Pultrüzyon sürecinde kullanılacak reçine tipi belirlenmelidir. Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi pultrüzyon işleminde genellikle termoset reçineler yani poliester, vinilester veya epoksi reçineler kullanılır. Reçine seçimi, çıkan ürünün mekanik özellikleri, kimyasal direnci ve diğer performans kriterleri üzerinde etkili olabilmektedir. Termoset reçineler, katalitik bir kimyasal reaksiyon yoluyla ham, sertleşmemiş reçine moleküllerini birbirine bağlar. Bu reaksiyon, ekzotermik bir şekilde güçlü bağlar oluşturur, reçine sıvıdan katıya dönüşür. Isıyla sertleşen bu reçine, katalize edildikten sonra, geri dönüşü olmayan bir şekilde sabitlenir. Bu durum, bir termoset kompozitin oluşturulduğunda, özel işlemler olmadan yeniden şekillendirilmesinin zor olduğu anlamına gelmektedir.

Pultrüzyonda kullanılacak reçine, özel formülasyonlara tabi tutularak istenen özelliklere uygun hale getirilir. Bu, reçinenin viskozitesini, sertleşme süresini kontrol etmeyi içerir. Çinko stearat, kalsit, talk ve dolomit gibi dolgu malzemeleri ile reçine viskozitesi ayarlanabilmektedir. Ayrıca çinko stearat, reçinelerde ayırıcı madde olarak da kullanılmaktadır. Poliester bazlı kompozitlerde dayanıklılık ve işlenebilirlik açısından iyileştirmeler sağlayan bu madde reaksiyon sırasında çekilen ürünün kalıp içerisinde rahat hareket etmesini sağlayacağı önerilmiştir [46].



Şekil 2.3.1. Çinko stearatın olası yapısı

Çalışmada reçine olarak CE 266 CTP tipi izohtalik stirenli reçine kullanılmıştır. Bu reçine, poliollerin (polihidrik alkoller) doymamış veya doymuş dibazik asitlerle reaksiyonu sonucu oluşan yoğunlaşma polimeridir ve polioller arasında etilen glikol, bulunurken, asitler arasında izohtalik asit yer almaktadır. Esterifikasyon reaksiyonlarının yan ürünü olan su, damıtma yoluyla sürekli olarak uzaklaştırılarak Le Chatelier ilkesine göre reaksiyon tamamlanmaktadır [47]. Poliesterin içerdiği stiren ise seyreltici olarak kullanılmaktadır. Stiren, reçinenin viskozitesini kontrol etmeye ve kütleme reaksiyonuna katılım sağlamaya yardımcı olmaktadır.



Şekil 2.3.2. İzofthalik asit ve mono etilen glikol ile üretilen izofthalik poliestere.

Pultrüzyon işleminde bu reçine, başlangıçta sıvı formda olan ve çapraz bağlanma ile katı hale dönüştürülen bir malzeme olduğu için bu dönüşüm, doymamış bağlarda serbest radikaller oluşturularak gerçekleşmektedir. Oluşan radikaller, bitişik moleküllerdeki diğer doymamış bağlara zincirleme reaksiyonuyla yayılıp, bu bağları süreç içinde birbirine bağlayacaktır. Genellikle kendiliğinden polimerleşme olmaz, ancak sıcaklığında etkisiyle stiren gibi maddelerle kolayca reaksiyona girebilmektedir [48].



Şekil 2.3.3. Çalışmada kullanılan izofthalik stirenli reçine

Kürlenme işleminde, reçinede başlangıçtaki serbest radikaller, katalizör yardımıyla indüklenecektir. Geçiş metal tuzları (Kobalt naftanat, kobalt oktoat, dimetil anilin(DMA) ve dietilen anilin(DEA).), genellikle çapraz bağlanma reaksiyonları için bir katalizör olarak kullanılır. Bu tür katkı maddeleri, genellikle radikal başlatıcının bağ ayrışma enerjisini düşürerek reaksiyonları hızlandıran bir rol oynarlar. Bu çalışmada katalizör olarak kobalt naftanat kullanılmıştır. Radikal oluşturucu olarak da peroksit kullanılmıştır.



Şekil 2.3.4. Çalışmada katalizör olarak kullanılan kobalt naftanat (solda) ve radikal oluşturucu olarak kullanılan peroksit (sağda)

Çalışmada reçine hazırlığında yapılan aşamalar özetlenecek olursa, 6 litre (L) izoftalik reçine içerisine 3 litre (L) çinko stearat ekleyip dikkatlice karıştırılmıştır. Homojen bir şekilde karıştığından emin olmak gerekmektedir. Aksi halde oluşacak topaklar kalıp içerisinde fitillerin ıslanmasına engel oluşturacağı gibi tıkanmalara da sebebiyet

verebilir. Oluşan çözeltiye katalizör olarak 21 gram (g) kobalt naftanat eklenerek tekrar homojen olacak şekilde iyice karıştırılmıştır ve aynı şekilde 42 gram (g) peroksit ekleyerek iyice karıştırılarak reçineyi kalıba dökmek için hazır hale getirilmiştir. Kürleme reaksiyonu sıcaklığı genellikle 75-100 °C arasında gerçekleşmektedir.

2.4. Kalıp Boyunca Sıcaklık Kontrolü

Sıcaklık kontrolü, pultrüzyon işleminde reçinenin polimerleşme sürecini yönetmek ve istenen fiziksel özelliklere sahip ürünleri elde etmek için kritik bir faktördür. Reçinenin sıcaklık özelliği, profilde homojen sertleşme ve istenen mekanik özelliklerin elde edilmesini sağlamak için dikkatlice kontrol edilmelidir. Genellikle reçinenin ısı geçiş sıcaklığı (T_g) üzerinde bir sıcaklıkta çalışarak, profillerin termal stabilitesi ve dayanıklılığı artırılabilir. Ayrıca, kalıp yüzeyine uygulanan sıcaklık, profilin kalıptan çıkarılmasını kolaylaştırır ve üretim sürecinin verimliliğini artırmaktadır. Optimal sıcaklık kontrolü, homojen küreme ve profil boyunca tutarlı özelliklere ulaşma açısından kritiktir.

Sıcaklık kontrolü, pultrüzyon işleminin ilk aşamasından itibaren başlar. Reçine hazırlığı sırasında, doğru sıcaklıkta tutulan reçine, kalıp içinde takviyelerle doyunlaşırken homojen bir şekilde dağılır. Bu, profilde istenilen fiziksel özelliklerin elde edilmesi için kritiktir [43]. Kalıpta sertleşme aşamasında, belirli bir sıcaklık profili ve zaman çizelgesi, reçinenin polimerleşme hızını ve takviyelerle entegrasyonunu etkiler. Sıcaklık kontrolünün dikkatlice ayarlanmaması durumunda, profillerin yüzey düzgünlüğü, iç yapısı ve mekanik dayanıklılığı gibi kritik özelliklerde sapmalar olabilir. Ayrıca, pultrüzyon işleminin sıcaklık kontrolü, üretim sürecinin verimliliğini ve tekrarlanabilirliğini de etkileyebilmektedir. Doğru sıcaklık parametreleri, ürünlerin kalitesini artırırken atıkları ve enerji maliyetlerini de minimize edebilmektedir.

Pultrüzyon işlemi aynı zamanda çekme teknolojisi içerdiğinden, çekme işlemini sıcaklıkla kontrol edebilecek bir sistem, kaliteli ve düzgün bir üretim açısından çok önemlidir. Reaksiyon sırasında reçine sıvı halden katı hale geçeceği için ister istemez tıkanmalar gözlemlenebilmektedir. Bu da üretimi ciddi şekilde etkileyebilir. Bu kontrol sistemi sayesinde tıkanmaların önüne geçerek bu problemin ortadan kalkması sağlanabilir.

Bu çalışmada, kalıp boyunca sıcaklığı kontrol edebilmek için, her alt ve üst kalıp parçasına ayrı ayrı olacak şekilde 220 V (volt) gerilimde çalışacak 700 W (watt) güce sahip 6 adet rezistans (ısıtıcı) kullanılmıştır. Bu rezistanslar, bağlandıkları kalıplara kontrol edilen sıcaklıkları iletebilecek şekilde entegre edilmiştir. Rezistanslar, LCD ekranlı termostatlı sıcaklık kontrol cihazlarıyla kontrol edilmektedir. Bu cihazlara her kalıbın sıcaklığını kontrol edecek Termokupllar bağlanmıştır. Kalıp sıcaklıklarının istenilen değere ulaşması bu Termokupllar sayesinde gerçekleşmektedir. Termokupllar kalıpların havuz ve kılavuz bölümlerinde reçinenin geçeceği yerlere en yakın olacak şekilde bağlanmıştır. Çünkü nihai ürün reçine sıcaklığına bağlı olduğu için istenilen ürünü üretmekte bu durum oldukça büyük bir önem arz etmektedir. Aksi halde reçine sıcaklığı kontrol edilemeyebilir ve bu da kopmalara ve reaksiyonun gerçekleşmemesine sebebiyet verebilir.

Termostatlara bağlanan Termokupllar, kalıba yerleştirildikten sonra termostatların LCD ekranından istenilen sıcaklık değerleri girilmiştir. Reaksiyon genellikle 80 °C’ lerde gerçekleşmeye başlamaktadır. Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi reçineyi ön ısıtma işlemine tutmak hem viskoziteyi azaltıp tıkanmalara engel olabileceği ve elyafların reçine ile tam olarak ıslanmasını sağlayacağı hem de reçinenin reaksiyona başlama hızını arttırıp daha hızlı bir üretim hızı sağlayacağı için kalıbın havuz kısmının sıcaklığı 45 °C’ de tutulmuştur. Reçinenin kurlenme reaksiyonun gerçekleşeceği 2. bölümde sıcaklık 80 °C’ de tutulmuştur. Termostatlar istenilen sıcaklığa ulaşınca rezistanslara verilen elektrik akımını kesmiş olsa da kalıp içerisinde sıcaklık dağılımından dolayı ister istemez Termokupllar 85-90 °C’ ler ölçmüştür. Fakat reçinenin kalıp içerisinde hareketi kalıbın sıcaklığının düşmesine sebep olması bu durumu tolere etmektedir. 3. Bölümün sıcaklığı ise yine 80 °C’ lere sabitlenmiştir. Kalıbın 2. bölümünde reaksiyonun tamamlanmasından emin olmak için bu sıcaklığa sabit tutulmuştur. Bu sayede reaksiyon düzgün bir şekilde tamamlanarak istenilen nihai ürün elde edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 2.4.1. Kalıplar için girilen sıcaklık değerleri (alt kısım) ve Termokupl sıcaklık değerleri (üst kısım)



Şekil 2.4.2. Kalıplara bağlanan Termokupllar

Profilin çekilmesi iki motorlu makaralı bant sistemi kullanılmıştır. Bu sistemde çekme hızı manuel olarak panelden kontrol edilebilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi çekme hızı nihai ürünün elde edilmesi için önem arz eden bir durumdur. Çekme hızını sıcaklığa entegre ederek kontrol etmek oldukça sağlıklı sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Çekme hızını sıcaklığa entegre edebilmek için, giriş beslemesi 220 V gerilime sahip, çıkışında da 4-20 mA (mili amper) arasında akım veren bir sıcaklık kontrol cihazı kullanılmıştır. Bu cihaza sıcaklığı kontrol etmesi için gerekli sıcaklık değeri girildiğinde, cihaz bant sisteminde belirlenen maksimum hız ile minimum hız arasında bir skala oluşturup motorların dönüş hızını ona göre ayarlamaktadır. Cihaza 60 °C girildiğinde ve Termokupl cihaz bant sisteminde belirlenen hız ile minimum hız arasında skala oluşturuyor ve Termokupl 0 °C' de bant sistemindeki motorlar belirlenen minimum hızda çalışıyor. Termokupl 60 °C ve üzerine ulaştığında ise motorlar belirlenen maksimum hızda çalışmaktadır. Termokupl, 0-60 °C arasında bir ölçüm yaptığında ise bant sistemindeki motorlar sıcaklık kontrol cihazının ayarladığı skalaya göre belirlenen hızda çalışmaktadır. Bunu sağlayan ise cihaz içerisinde bulunan PID kontrol sistemidir.

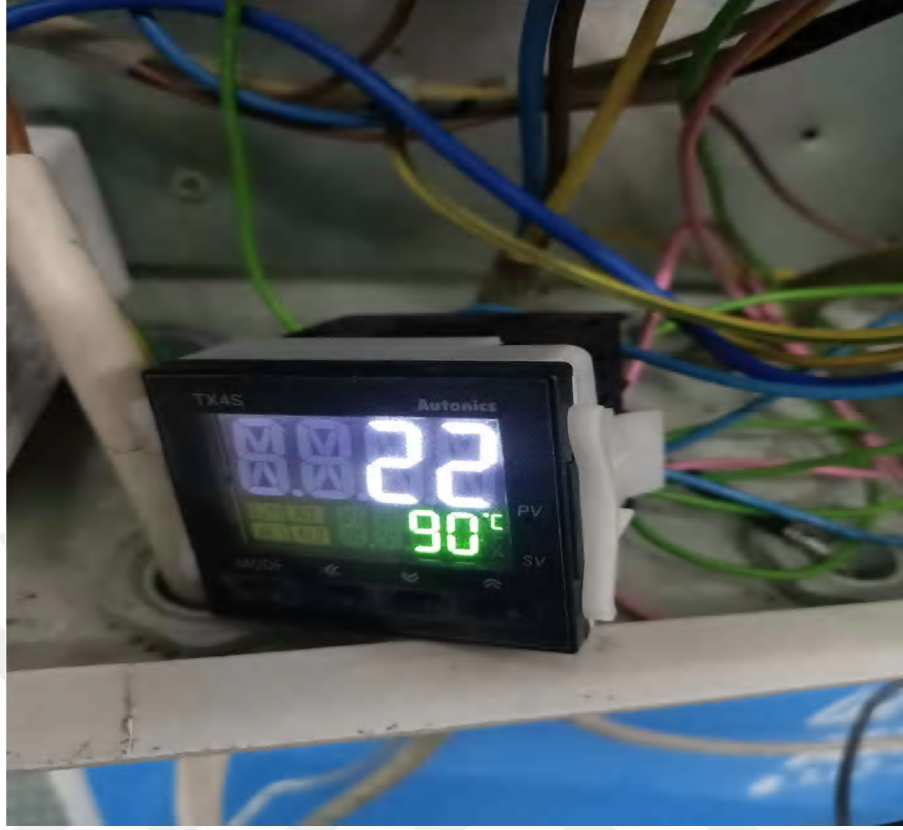


Şekil 2.4.3. Çekme işlemini sağlayacak sistem.



Şekil 2.4.4. Çekme işlemini sağlayan sisteminin kontrol panosu. Üstte büyük olan motorların hızını belirleyen kontrol ekranı, alttaki küçük ekran ile sıcaklık kontrolünün yapıldığı ekran.

Çekme hızını kontrol etmek için çekme sistemine bağlı olan sıcaklık kontrol cihazına 90 °C' lik bir değer girilmiş ve bu cihaza bağlı Termokupl ise nihai ürünün çıkacağı son kalıp parçasına bağlanmıştır. Reaksiyon kalıbın 2. parçasında başlamaktadır. Reaksiyon ekzotermik bir reaksiyon olduğu için sıcaklık artışı oluşturacaktır. Bu da kalıbın son parçasında sıcaklığın artmasına sebep olmaktadır. Aynı zamanda katılaşan reçine kalıba belli bir basınç oluşturacağı için olası bir kopma ve tıkanma durumlarının olmaması için kontrol bu bölümden sağlanmak istenmiştir. Termokupldan okunan sıcaklık değeriyle motor hızı ayarlanarak kopmaların ve tıkanmaların önüne geçilmiştir ve nihai ürün elde edilmiştir.



Şekil 2.4.5. Çekme makinesine bağlanan sıcaklık kontrol cihazında girilen değerler.

3. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, kapalı banyo pultrüzyon yönteminin insan sağlığı ve reçine sağlığı üzerindeki olumlu etkilerini inceleyerek, bu yöntemin sektördeki önemini vurgulamıştır. Kapalı banyo pultrüzyon yöntemi, reçine ve fiber takviye malzemeleriyle doğrudan temasını en aza indirir. Bu da endüstriyel alanda bu yöntemle üretim yapan işçilerin potansiyel toksik maddelere maruz kalma riskini azaltmaktadır. Kontrollü üretim ortamı, ortamdaki hava kalitesini artırarak solunum yoluyla alınan zararlı madde miktarını düşürür. Aynı zamanda reçinenin açık ortamla etkileşimini kestiği için daha kaliteli üretim sağlamaktadır.

Ayrıca bu çalışmada, kapalı banyo pultrüzyon yönteminde kalıp boyunca sıcaklık kontrolünün üretim süreci ve nihai ürün özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, sıcaklık kontrolünün profil homojenliği, mekanik dayanıklılık ve yüzey kalitesi üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermiştir.

Sıcaklık titizlikle kontrol edildiğinde, reçine ve fiber takviyelerin kapalı kalıp içinde daha homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiş olup bu durum, profillerin içyapısında ve yüzey düzgünlüğünde iyileşmeye yol açmıştır. Homojen bir dağılım, profillerin mekanik özelliklerinde tutarlılığı artırmış ve istenmeyen kusurları önlemiştir. Ayrıca, sıcaklık kontrolünün profil sertleşme sürecini yönlendirdiği belirlenmiştir. Doğru sıcaklık profili kullanıldığında, reçinenin polimerleşme hızı optimize edilebilir ve takviyelerle daha etkili bir entegrasyon sağlanabilir. Bu, nihai ürünlerin istenen dayanıklılık, termal stabilite ve mekanik performansı elde etmesine imkan tanımaktadır.

Sıcaklık profili ayrıca üretim sürecinin verimliliğini de etkilemiştir. Optimal sıcaklık koşulları altında, ürünlerin sertleşme süresi azaltılabilir, bu da üretim hızını artırabilir.

Enerji maliyetleri ve atık üretimi açısından da avantajlar sağlanabilir. Ayrıca, çekme hızını sıcaklık ile kontrol ederek oluşacak kopma ve tıkanma problemleri de önlenmiştir.

Sonuç olarak, kapalı banyo pultrüzyon yönteminde kalıp boyunca sıcaklık kontrolü, üretim sürecinin kritik bir unsuru olarak belirlenmiştir. Bu kontrolün doğru bir şekilde sağlanması, fiber takviyeli kompozit profillerin kalitesini artırabilir, üretim sürecini optimize edebilir ve maliyetleri düşürebilir. Bu sonuçlar, endüstriyel uygulamalarda daha etkili ve sürdürülebilir üretim süreçleri geliştirmek isteyen araştırmacılara ve mühendislere rehberlik edebilir.



Şekil 3.1.1. Kapalı banyo pultrüzyon yöntemiyle elde edilen ürün



Şekil 3.1.2. Elde edilen ürünün çekme sistemiyle çekilmesi.

KAYNAKÇA

1. Summerscales J., 2003, Pultrusion: State of the Industry, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, **22**(10): 889-898.
2. Ünal, A., Gülten, Z. 1998, "Pultrusion Yöntemi İle Kompozit Malzeme Üretimi", Araştırma Makalesi, YTÜDER, İstanbul,
3. Bishop R. C., 2017, Pultrusion: Where We've Been and Where We're Going, **SAMPE Journal**, **53**(1): 15-18.
4. Bezerra, R., Henning, F., 2017, Modelling and simulation of the pultrusion process with closed injection and impregnation molds. PhD, Augsburg, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 151.
5. Brown, A. et al., 2018, "Impact of Resin Preparation Methods on Pultruded Composite Properties." *Polymer Engineering and Science*, 25(4): 567-580.
6. Loss A. C., 2016, "Pultrusion of Advanced Fiber-reinforced Polymers," **Journal of Composite Materials**, **50**(26): 3719-3746.
7. Meyers M. A., 2010, Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design, **Journal of Applied Polymer Science**, **116**(3): 1699-1701.
8. Advani S. G., 1998, Pultrusion Process: Modeling and Simulation, **Journal of Composite Materials**, **32**(8): 804-826.
9. Hollaway L., 1993, Introduction to Composite Materials Design, **Polymer Composites**, **14**(4): 317-321.
10. Gibson A. G., 2005, "Design and Analysis of Composite Structures," **Journal of Composite Materials**, **39**(3): 275-291.
11. Fiberline Building Profiles, "Pultrusion Fiberline Composites, "<http://fiberline.com/pultrusion>" [erişim tarihi: 15/12/2023].
12. Koppernaes C., Nolet S. G. and Fanucci J. P., 1991, Method and apparatus for wetting fiber reinforcements with matrix materials in the pultrusion process using continuous in-line degasing., **United States Patent 5 073 413**, 1991.
13. Gauchel, J. V. and Lehman, R. N., 1998, Apparatus for resin impregnated pultrusion, **United States Patent 5 747 075**, 1998.
14. Brown, R. J., Kharchenko, S., Coffee, H. D. and Huang, I., 2013, System for producing pultruded components, **United States Patent 8 597 016**, 2013.

15. Dubé, M. G., Batch, G. L., Vogel, J. H. and Macosko, C. W., 1995, Reaction Injection Pultrusion of thermoplastic and thermoset Composites, *Polymer Composites*, 16(5): 378–385.
16. Advanced Glassfiber Yarns LLC, Technical Paper, “High Strength Glass Fibers”, p. 2-11, March 2003.
17. Chen, C. and Wang, W., 1998, The Development of Glass Fiber Reinforced Polystyrene For Pultrusion. II: Effect of Processing Parameters for Optimizing the Process, ***Journal Of Polymer Composites***, 19(4): 423-429.
18. Gillham, J. K., 1986, Formation and Properties of Thermosetting and High Tg Polymeric Materials, *Polymer Engineering and Science*, pp. 1429-1433, 26 November 1986.
19. Springer, G. S., 1992, Introduction to Composite Materials Design, CRC Press.
20. Kassapoglou, C., 2018, Design and Analysis of Composite Structures: With Applications to Aerospace Structures., CRC Press.
21. Batch, G. L., Cumiskey, S. and Macosko, C. W., 2002, Compaction of fiber reinforcements, ***Polymer Composites***, 23(3): 307-318.
22. Weitzenböck, J. R., Shenoi, R. A. And Wilson, P. A., 1999, Radial flow permeability measurement. Part A: Theory, ***Composites Part A: Applied Science and Manufacturing***, 30(6): 781–796.
23. Weitzenböck, R. J., Shenoi, R. A. And Wilson, P. A., 1999, Radial flow permeability measurement. Part B: Application, ***Composites Part A: Applied Science and Manufacturing***, 30(6): 797–813.
24. Halley, P. J. And Mackay, M. E., 1996, Chemorheology of thermosets - an overview, ***Polymer Engineering & Science***, 36(5): 593-609.
25. Yousefi, A., Lafleur, P. G. and Gauvin, R., 1997, Kinetic studies of thermoset cure reactions: A review, ***Polymer Composites***, 18(2): 157-168.
26. Kamal, M. R. and Sourour, S., 1973, Kinetics and thermal characterization of thermoset cure, ***Polymer Engineering and Science***, 13(1): 59-60.
27. Kamal, M. R., 1974, Thermoset characterization for moldability analysis, ***Polymer Engineering and Science***, 14(3): 231-239.
28. Joshi, S. and Lam, Y., 2006, Integrated approach for modelling cure and crystallization kinetics of different polymers in 3D pultrusion simulation, ***Journal of Materials Processing Technology***, 174(1-3): 178-182.

29. Kim, D. H., Han, P. G., Jin, G. H. and Lee, W. I., 1997, A Model for Thermosetting Composite Pultrusion Process, **Journal of Composite Materials**, **31**(20): 2105-2122.
30. Baran, I., Akkerman, R. and Hattel, J. H., 2014, Material characterization of a polyester resin system for the pultrusion process, *Composites Part B: Engineering*, 60: 194-201.
31. Ding, Z., Li, S. and Lee, L. J., 2002, Influence of heat transfer and curing on the quality of pultruded composites. II: Modeling and simulation, **Polymer Composites**, **23**(5): 957-969.
32. Johnson, A. et al., 2015, Optimization of Pultrusion Process Parameters for Enhanced Composite Performance, **Composites Science and Technology**, **120**: 51-59.
33. Young, R. E., 1976, *Unsaturated Polyester Technology*, P.E. Bruins, Ed. Garden and Breach, New York, 315.
34. Ridrr, S. H. and Hardy, E. E., 1962, Polymerization and Polycondensation Processes, N.A.J. Platzers Ed, *Advances in Chemistry*, Series no. 34, American Chemical Society, Washington Dc., 173.
35. Dholakiya, B., 2012, *Unsaturated Polyester Resin for Specialty Applications*, InTech, doi: 10.5772/48479
36. Boenig, H. V., 1960, *Unsaturated Polyesters, Structure and Properties*, Elsevier, Amsterdam, 1960.
37. Parkyn, B., Lamb, F. and Clinton, B. V., 1967, *Polyesters: Unsaturated Polyesters and Polyester Plasticizers*; Elsevier, New York, 2, 1967.
38. Frodet, A. and Arland, P., 1989, *Unsaturated Polyesters: Comprehensive Polymer Science*, Pergamon Press, New York, 19(331).
39. Mark, H. F., Gayord, N. G. and Bikales, N. M., 1970, *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, John Wiley and Sons, New York.
40. Nalampang, K., Johnson, A. F., 2003, Kinetics of polyesterification: modelling and simulation of unsaturated polyester synthesis involving 2-methyl-1,3-propanediol, **Polymer**, **44**(19): 6103-6109, ISSN 0032-3861.
41. Vargas, M. A., Sachsenheimer, K., Guthausen, G., 2012, In-situ investigations of the curing of a polyester resin, **Polymer Testing**, **31**(1): 127-135, ISSN 0142-9418

42. Patel, Dr.Rajarshi., 2013, Thermal and Mechanical Properties of Adipic Acid Modified Unsaturated Polyester Resin and Jute Composite, **Journal of Chemical and Pharmaceutical Research**, **2**: 131-138.
43. Joshi, S. C., Lam, Y. C., Tun, U. W., 2003, Improved cure optimization in pultrusion with pre-heating and die-cooler temperature, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(12): 1151-1159, ISSN 1359-835X
44. Ranganayakulu, A. N. S., Singh, D. D., Babu, B. S., Vardhan, T. S., 2019, Experimental development of FRP pultrusion moulds, **Materials Today: Proceedings**, **19**(2): 354-360, ISSN 2214-7853
45. Fabrication and Characterization of E-Glass Fiber Reinforced Unsaturated Polyester Resin Based Composite Materials - Scientific Figure on ResearchGate, https://www.researchgate.net/figure/Digital-images-of-E-glass-fiber-mat-A-and-roll-B_fig1_331378437 [erişim tarihi: 01 Jan, 2024]
46. Haq, U., 2007, M.I. Applications of unsaturated polyester resins., **Russ J Appl Chem** **80**: 1256–1269.
47. Ball, D. W., Key, J. A., 2014, Shifting Equilibria: Le Chatelier's Principle, *Introductory Chemistry – 1st Canadian edition*, Victoria, B.C: BCcampus: OpenEd.
48. Weatherhead, R. G., 1980, Catalysts, Accelerators and Inhibitors for Unsaturated Polyester Resins, *FRP Technology: Fibre Reinforced Resin Systems*, Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 204–239.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Cemil Safa GÜLSEVER
Uyruğu: Almanya

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği	2020
Lise	Kocasinan Anadolu Lisesi, Kayseri	2013

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2020-Halen	RETEL REZİSTANS TEL AMB. PLS. MET. SAN. TİC. A.Ş.	4

YABANCI DİL

İngilizce